



TUGAS AKHIR – MO 141326

**STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA PIPA MELETAK DAN
IN-TRENCH AKIBAT GELOMBANG REGULER**

NOVIA DWI RAHAYU

NRP. 4312100033

Dosen Pembimbing :

Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.

Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



FINAL PROJECT – MO 141326

**EXPERIMENTAL STUDY OF SCOURING ON SEABED AND
IN-TRENCH PIPELINE UNDER REGULAR WAVE**

NOVIA DWI RAHAYU

NRP. 4312100033

SUPERVISOR :

Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.

Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2017

**STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA PIPA MELETAK DAN
IN-TRENCH AKIBAT GELOMBANG REGULER**

TUGAS AKHIR

Ditujukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Novia Dwi Rahayu

NRP. 4312100033

Disetujui oleh pembimbing tugas akhir :

1. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.

(Pembimbing 1)

2. Dr. Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc.

(Pembimbing 2)

3. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc.

(Penguji 1)

SURABAYA, 25 JULI 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI EKSPERIMEN SCOURING PADA PIPA MELETAK DAN *IN-TRENCH* AKIBAT GELOMBANG REGULER

Nama Penulis : Novia Dwi Rahayu
NRP : 4312100033
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

Abstrak

Jaringan pipa bawah laut merupakan salah satu fasilitas pendistribusian minyak dan gas bumi dari platform lepas pantai menuju pantai yang dianggap lebih efisien. Namun, penggunaan pipa masih mempunyai kendala dimana peletakkan pipa akan mempengaruhi lingkungan sekitarnya. Pola aliran air akan berubah ketika terdapat struktur yang menghalangi aliran. Hal tersebut dapat menyebabkan penggerusan (*scouring*) di bagian bawah pipa yang mengakibatkan kondisi pipa *freespan*. Jika *freespan* terlalu panjang, maka akan terjadi kegagalan struktur dengan waktu singkat. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan eksperimen mengenai *scouring* terhadap *pipeline* di *flume tank* Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS. Model uji yang digunakan yaitu pipa berbahan PVC yang berukuran diameter 1,5 in. Ukuran d_{50} tanah yaitu 0.55 mm dengan *specific gravity* 2.8. Gelombang yang digunakan yaitu gelombang reguler dengan variasi tinggi gelombang sebesar 11 cm, 13 cm, dan 15 cm. Posisi pipa terhadap *seabed* divariasikan meletak ($e/D=0$) dan *in-trench* ($e/D = -0.05$, $e/D = -0.075$, dan $e/D = -0.1$). Kedalaman air 50 cm dan 40 cm. Kedalaman dan lebar *scouring* terbesar terjadi pada kondisi pipa meletak ($e/D=0$) dengan kedalaman air 40 cm dan tinggi gelombang 15 cm. Kedalaman *scouring* 0.989 cm dan lebar *scouring* 8.314 cm. Waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya kedalaman *scouring* maksimum yaitu 25 menit.

Kata kunci : eksperimen, gelombang reguler, pipa bawah laut, *scouring*

Halaman ini sengaja dikosongkan

EXPERIMENTAL STUDY OF SCOURING ON SEABED AND IN-TRENCH PIPELINE UNDER REGULAR WAVE

Name : Novia Dwi Rahayu
NRP : 4312100033
Departement : Teknik Kelautan
Supervisor : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

ABSTRACT

Submarine pipeline is one of the media for the distribution of oil and gas from offshore platform to on shore which is considered more efficient. However, the use of pipe still has any problem about its positioning that can affect the environment around. The pattern of water flow will change when there is a structure that blocks flow. That can cause scouring at the bottom of the pipe resulting in a freespan pipe condition. If not correctly calculated when designing the pipe, then there will be structural failure with a short time. In this final project will be conducted experiments on the effect of scouring on the pipeline in the flume tank of Energy and Ocean Environment Laboratory of Ocean Engineering Department FTK ITS. The test model used is a PVC pipe with 1.5 inch in diameter. Soil diameter size is d_{50} by 0.55 mm with specific gravity of 2.8. Wave used is regular waves with variations of wave height, on seabed and in-trench pipe and water depth. Pipe position toward seabed was varied by on-seabed ($e/D=0$) and in-trench ($e/D = -0.05$, $e/D = -0.075$, and $e/D = -0.1$). Water depth are 50 cm and 40 cm. The largest depth and width of scouring occurs in pipe conditions ($e / D = 0$) with a water depth of 40 cm and a wave height of 15 cm. Scouring depth 0.989 cm and scouring width 8.314 cm. Time spend on a maximum height of scouring is 25 minutes.

Keyword : experimental modelling, regular wave, scouring, submarine pipeline

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini berjudul “**Studi Eksperimen *Scouring* pada Pipa Meletak dan *In-Trench* Akibat Gelombang Reguler**”.

Tugas Akhir ini disusun oleh penulis untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana teknik pada program studi S-1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Tugas Akhir ini mengenai eksperimen guna mencari kedalaman, lebar dan laju propagasi *scouring* berdasarkan variasi yang telah ditentukan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laporan ini. Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 16 Juli 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis juga tidak lupa menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang membantu dalam penyelesaian penyusunan laporan Tugas Akhir ini. Terimakasih sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada :

1. Kedua orang tua saya yang selalu mendukung baik secara moril maupun finansial.
2. Bapak Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing 1 yang telah bersedia membimbing penulis dan memberikan pengetahuan yang lebih.
3. Bapak Dr. Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc. selaku dosen pembimbing 2 yang telah membimbing dan memberikan arahan untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo P., S.T dan Bapak Yoyok Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D., selaku ketua jurusan dan wakil jurusan Teknik Kelautan, serta keluarga besar dosen dan karyawan atas bimbingannya selama ini.
5. Bapak Drs. Mahmud Mustain, M.Sc., Ph.D, selaku kepala Laboratorium Lingkungan dan Energi Laut atas dukungannya selama melakukan eksperimen Tugas Akhir penulis.
6. Bapak M. Mochtar Arif selaku teknisi Laboratorium Lingkungan dan Energi Laut yang telah membantu pelaksanaan eksperimen.
7. Liestia Budiarti yang telah membantu pemahaman penulis mengenai tugas akhir ini
8. Teman-teman lainnya yang membantu pengerjaan Tugas Akhir penulis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori.....	7
2.2.1 Teori Gelombang Reguler.....	7
2.2.2 <i>Scouring</i>	9
2.2.3 Keulegan-Carpenter Number.....	12
2.2.4 Kedalaman <i>Scouring</i>	12
2.2.5 Lebar <i>Scouring</i>	16
2.2.6 Periode <i>scouring (time scale)</i>	16
2.2.7 Pemodelan Fisik.....	16
2.2.7.1 Syarat-syarat Keserupaan.....	17
2.2.7.2 Hukum Keserupaan.....	19
2.2.7.3 Analisa Dimensi.....	20

2.2.8 <i>Specific Gravity</i> Tanah.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2 Prosedur Penelitian.....	23
3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data.....	23
3.2.2 Perancangan dan Persiapan Pengujian.....	23
3.2.3 Pengujian Tanah.....	26
3.2.4 Kalibrasi Alat Uji.....	27
3.2.5 Pengujian <i>Scouring</i>	27
3.2.6 Pengukuran dan Pencatatan Parameter <i>Scouring</i>	28
3.2.7 Analisa dan Pembahasan.....	28
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Data Tanah.....	29
4.2 Data Gelombang.....	31
4.3 Hasil Eksperimen.....	33
4.3.1 Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$).....	33
4.3.2 Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$).....	34
4.3.3 Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.075$).....	35
4.3.4 Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.1$).....	36
4.4 Analisa Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i>	37
4.5 Analisa Parameter Tak Berdimensi.....	39
4.6 Perbandingan dengan Penelitian Lain.....	44
4.7 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Terhadap Waktu.....	45
BAB V PENUTUP.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A Foto Hasil Eksperimen <i>Scouring</i> Maksimum.....	A-1
LAMPIRAN B Laju Propagasi Tiap Variasi Eksperimen.....	B-1
LAMPIRAN C Perhitungan Parameter Tak Berdimensi.....	C-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Konsumsi Enersi Tiap Sektor.....	1
Gambar 2.1 Definisi istilah gelombang dasar, sinusoidal, progresif.....	7
Gambar 2.2 Pergerakan Partike Air (<i>Shore Protection Manual</i>).....	8
Gambar 2.3 Jenis <i>Scouring</i> Pipa Leeuwestein (1984).....	11
Gambar 2.4 <i>Scour</i> Akibat Gelombang.....	11
Gambar 2.5 <i>Scour</i> Akibat Arus.....	11
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 3.2 Skenario Eksperimen Tampak Samping.....	27
Gambar 3.3 Skenario Eksperimen Tampak Atas.....	28
Gambar 4.1 Grafik Pembagian Butir Tanah (Gradasi).....	30
Gambar 4.2 Excel Macro Refana.....	31
Gambar 4.3 Software Anaware.....	32
Gambar 4.4 Kondisi Awal Pipa Meletak ($e/D=0$).....	33
Gambar 4.5 Hasil <i>Souring</i> Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm	34
Gambar 4.6 Kondisi Awal Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$).....	34
Gambar 4.7 Hasil <i>Souring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$) Tinggi Gelombang (H) = 15 cm	35
Gambar 4.8 Kondisi Awal Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.075$).....	35
Gambar 4.9 Hasil <i>Souring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.075$) Tinggi Gelombang (H) = 15 cm	36
Gambar 4.10 Kondisi Awal Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.1$).....	36
Gambar 4.11 Hasil <i>Souring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.1$) Tinggi Gelombang (H) = 15 cm.....	37
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Ketinggian Relatif Gelombang (H/gT^2) dengan Bilangan Tak Berdimensi Kedalaman <i>Scouring</i> (S/D)...	39
Gambar 4.13 Grafik Hubungan Ketinggian Relatif Gelombang (H/gT^2) dengan Bilangan Tak Berdimensi Lebar <i>Scouring</i> (w/D).....	40
Gambar 4.14 Grafik Hubungan Kedalaman Relatif Gelombang (d/gT^2) dengan Bilangan Tak Berdimensi Kedalaman <i>Scouring</i> (S/D)...	40

Gambar 4.15 Grafik Hubungan Kedalaman Relatif Gelombang (d/gT^2) dengan Bilangan Tak Berdimensi Lebar <i>Scouring</i> (w/D).....	41
Gambar 4.16 Grafik Hubungan KC dengan Bilangan Tak Berdimensi Kedalaman <i>Scouring</i> (S/D).....	41
Gambar 4.17 Grafik Hubungan KC dengan Bilangan Tak Berdimensi Lebar <i>Scouring</i> (w/D).....	42
Gambar 4.18 Grafik Hubungan <i>Burial Depth-Diameter Ratio</i> (e/D) dengan Bilangan Tak Berdimensi Kedalaman <i>Scouring</i> (S/D)...	42
Gambar 4.19 Grafik Hubungan <i>Burial Depth-Diameter Ratio</i> (e/D) dengan Bilangan Tak Berdimensi Lebar <i>Scouring</i> (w/D).....	43
Gambar 4.20 Grafik Hubungan <i>Shield Parameter</i> (Θ) dengan Bilangan Tak Berdimensi Kedalaman <i>Scouring</i> (S/D).....	43
Gambar 4.21 Grafik Hubungan <i>Shield Parameter</i> (Θ) dengan Bilangan Tak Berdimensi Lebar <i>Scouring</i> (w/D).....	44
Gambar 4.22 Pengaruh KC Terhadap S/D Hasil Eksperimen, Penelitian Yasa (2011), Xu, J. et al (2010).....	45
Gambar 4.23 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm, Kedalaman Air (d) = 50cm....	46
Gambar 4.24 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm, Kedalaman Air (d) = 40cm.....	46
Gambar 4.25 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm, Kedalaman Air (d) = 40cm....	47
Gambar 4.26 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.075$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm, Kedalaman Air (d) = 40cm....	48
Gambar 4.27 Laju Propagasi <i>Scouring</i> Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.1$), Tinggi Gelombang (H) = 15 cm, Kedalaman Air (d) = 40cm....	48
Gambar 4.28 Grafik Proses Terjadinya <i>Scouring</i> Hingga Mencapai Kesetimbangan pada Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$).....	49
Gambar 4.29 Grafik Proses Terjadinya <i>Scouring</i> Hingga Mencapai Kesetimbangan pada Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$, $e/D=-0.075$, $e/D=-0.1$).....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi pada Eksperimen.....	24
Tabel 4.1 Hasil Uji <i>Specific Gravity</i>	29
Tabel 4.2 Analisa Pembagian Butir (Gradasi).....	30
Tabel 4.3 Format Penamaan File Kalibrasi.....	31
Tabel 4.4 Tinggi dan Periode Gelombang.....	32
Tabel 4.5 Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i> Kondisi $e/D=0$	33
Tabel 4.6 Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i> Kondisi $e/D=-0.05$	35
Tabel 4.7 Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i> Kondisi $e/D=-0.075$	36
Tabel 4.8 Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i> Kondisi $e/D=-0.1$	37
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Empiris Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i>	38
Tabel 4.10 Perbandingan Perhitungan Empiris dengan Eksperimen.....	38
Tabel 4.11 Kedalaman <i>Scouring</i> Berdasarkan Tiap Waktu Kondisi Pipa Meletak ($e/D=0$).....	48
Tabel 4.12 Kedalaman <i>Scouring</i> Berdasarkan Tiap Waktu Kondisi Pipa <i>In-Trench</i> ($e/D=-0.05$, $e/D=-0.075$, $e/D=-0.1$).....	49

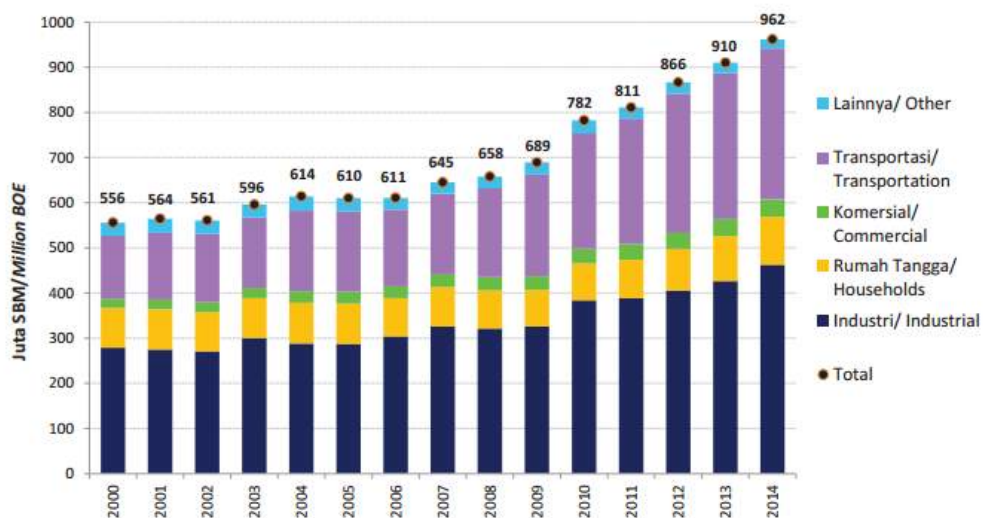
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembang suatu negara maka kebutuhan energi akan meningkat. Sektor yang meliputi yaitu industri, transportasi, rumah tangga lainnya. Berdasarkan data konsumsi energi tiap sektor oleh BPPT - Outlook Energi Indonesia 2016 menjelaskan bahwa setiap tahun terjadi peningkatan kebutuhan energi.



Gambar 1.1 Konsumsi energi tiap sektor
(BPPT – Outlook Energi Indonesia 2016)

Indonesia memiliki wilayah laut yang luas dan berpotensi besar dalam pemanfaatan pemenuhan kebutuhan energi diatas. Salah satu potensi yang dimiliki yaitu sumber daya minyak dan gas bumi (migas). Dalam penanganannya, dibutuhkan sistem pendistribusian yang menunjang hasil produksi migas. Salah satu alternatif yang dapat digunakan yaitu dengan jaringan pipa bawah laut. Pipa digunakan sebagai media transportasi migas dari platform lepas pantai menuju pantai.

Jaringan pipa bawah laut memiliki permasalahan tersendiri yaitu kondisi morfologi dasar laut yang tidak rata, keberadaan kabel komunikasi bawah laut, gelombang dan arus. Pipa dapat diletakkan pada permukaan dasar laut maupun di benamkan dalam dasar laut. Perlu dilakukan pengawasan penuh terhadap

keberadaan pipa migas bawah laut yang sesuai aturan standar dan aturan perundangan yang berlaku. Proses kerja yang terus menerus menuntut desain pipa bawah laut harus sesuai kondisi dasar laut agar tetap stabil. Salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam proses desain adalah penggerusan (*scouring*) sekitar pipa.

Scouring merupakan salah satu fenomena yang banyak dialami oleh struktur bawah laut akibat perubahan pola aliran gelombang, arus, maupun kombinasi keduanya. Aliran yang semula terus menjalar tanpa ada halangan harus bertumbukan dengan struktur yang menyebabkan aliran menyebar. Hal tersebut dapat meningkatkan transpor sedimen dikarenakan tegangan geser dasar rata-rata dan tingkat turbulensi yang meningkat di sekitar struktur. Adanya lubang *scouring* menyebabkan pipa membentang bebas dan akan beresiko fatal. Pipa yang menggantung dapat menyentuh bagian bawah lubang *scouring* yang mungkin diikuti oleh penimbunan terhadap pipa tersebut. Kondisi tersebut dapat menyebabkan terjadinya kegagalan struktur. Perancang harus mempertimbangkan kemungkinan terjadinya *scouring* secara signifikan dan memantau kondisi struktur di lapangan. Rancangan dapat dimodifikasi untuk mengurangi resiko kerusakan.

Dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan eksperimen untuk meninjau pengaruh *scouring* terhadap pipa bawah laut. Pengujian menggunakan model fisik yang telah diskalakan di laboratorium Flume Tank dimana gelombang yang dibangkitkan yaitu gelombang reguler. Hasil dari penelitian ini yaitu kedalaman maksimum, lebar dan laju propagasi *scouring*. Diharapkan data hasil uji dapat menjadi bahan pertimbangan untuk penanggulangan *scouring* pada pipa bawah laut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun perumusan masalah yang akan dibahas pada Tugas Akhir adalah:

1. Bagaimana kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi pada kondisi pipa meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler?

2. Bagaimanakah hubungan kedalaman dan lebar *scouring* terhadap pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler dengan variasi tinggi gelombang dan kedalaman air?
3. Bagaimana laju propagasi *scouring* terhadap pipa meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengetahui kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi pada kondisi pipa meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler
2. Mengetahui hubungan kedalaman dan lebar *scouring* terhadap pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler dengan variasi tinggi gelombang dan kedalaman air
3. Mengetahui laju propagasi *scouring* terhadap pipa meletak dan *in-trench* akibat gelombang reguler

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari pengujian tugas akhir ini yaitu untuk mengetahui *scouring* yang terjadi akibat faktor tinggi gelombang, kondisi pipa terhadap dasar, dan kedalaman air. Hasil eksperimen dapat menjadi pertimbangan untuk validasi percobaan numerik yang telah ada atau yang akan dibuat sesuai dengan permasalahan yang ada.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberikan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Analisa *scouring* yang dilakukan merupakan analisa dua dimensi
2. Gelombang yang digunakan yaitu gelombang reguler
3. Kondisi pipa terletak diatas dasar laut dan terbenam dalam dasar laut
4. Tidak ada pelindung pipa
5. Kemiringan *seabed* diabaikan
6. Sudut aliran air terhadap pipa tegak lurus ($\alpha = 90^\circ$)
7. Ukuran diameter tanah d_{50}

8. Ukuran diameter pipa 1,5 in.
9. Berat jenis dan tebal pipa sebenarnya diabaikan
10. Model uji pipa berbahan PVC
11. Variasi pada eksperimen yaitu e/D dan tinggi gelombang
12. Nilai $e/D \leq 0$

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Berisi tentang gambaran mengenai pelaksanaan penelitian yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan yang menjawab rumusan masalah, manfaat dan batasan masalah yang akan ditinjau dalam penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Berisi tentang teori-teori maupun rumus yang menunjang pengerjaan penelitian. Penjelasan tersebut berasal dari buku, jurnal, tugas akhir terdahulu, dan lain sebagainya.

BAB III Metodologi Penelitian

Berisi mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan selama proses penelitian. Secara teknis mulai dari awal pengerjaan hingga akhir.

BAB IV Analisa Hasil

Berisi tentang analisa dari seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan menggunakan rumus empiris yang telah di tulis pada dasar teori maupun referensi lainnya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Hasil yang telah dihitung akan dapat disimpulkan dan diberi saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Jaringan pipa bawah laut merupakan salah satu sarana untuk memindahkan minyak dan gas bumi mentah dari sumur minyak menuju ke pantai. Pipa bawah laut dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Jaringan pipa mengangkut minyak dan atau gas dari sumur bawah laut ke *manifold* bawah laut
2. Jaringan pipa mengangkut minyak dan atau gas dari *manifold* bawah laut ke platform produksi
3. Jaringan pipa mengangkut minyak dan atau gas antar platform produksi
4. Jaringan pipa mengangkut minyak dan atau gas dari platform produksi ke pantai
5. Jaringan pipa mengangkut air atau bahan kimia dari platform produksi, melalui *manifold* injeksi bawah laut ke sumur injeksi.

Jaringan pipa bawah laut harus didesain sedemikian rupa agar dapat menahan beban lingkungan sekitar. Pipa yang ditempatkan di dasar perairan akan menyebabkan perubahan kecepatan fluida lokal yang membuat gerusan pada dasar laut. Kerusakan biasanya terjadi ketika gelombang laut besar yang meningkatkan arus bawah. Interaksi aliran turbulen dengan seabed menjadi sangat kompleks ketika terganggu oleh struktur dan alirannya membawa endapan yang tersuspensi (Whitehouse, 1998). *Scour* di sekitar pipa merupakan dampak dari interaksi aliran dengan *seabed* (Zhao and Fernando, 2007). Kedalaman lubang gerusan dan bentuk keseluruhan lubang diprediksi sesuai dengan percobaan laboratorium. Gaya drag dan inersia horizontal besar dapat membuat gerusan yang membongkar pipa terkubur. Gerusan pada permukaan dasar laut akan mengakibatkan *free span*. *Free span* dapat terjadi ketika kontak antara pipa dengan dasar lalu hilang dan memiliki jarak pada permukaan dasar laut (Guo, 2005).

Nugraha (2012) menganalisa pengaruh *scouring* pada pipa bawah laut (studi kasus pipa gas transmisi SSJW jalur pipa gas Labuhan Maringgai-Muara

Bekasi). Hasil analisa membandingkan antara besar kedalaman *scouring* terhadap panjang *free span* yang diijinkan. Nugroho (2011) menganalisa *scouring* pipa bawah laut Kodeco jalur Poleng-Gresik dengan variasi tipe tanah. Dalam perhitungannya digunakan persamaan parameter arus dan gelombang.

Cheng, et al. (2014), dalam penelitiannya 3D Scour Below Pipelines Under Waves And Combined Waves And Currents, melakukan eksperimen *scouring* pada pipa dengan kondisi gelombang saja serta kombinasi gelombang dan arus. Laju *scouring* dilihat dari *Keulegan-Carpenter number* (KC) yang diperoleh. Semakin dalam pipa terpendam semakin rendah laju propagasi *scouring*. Sebaliknya, laju propagasi semakin meningkat seiring bertambahnya nilai KC.

Yasa (2011), dalam jurnalnya yang berjudul Prediction of the Scour Depth under Submarine Pipelines-in Wave Condition melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengusulkan formula baru yang sederhana untuk memprediksi kedalaman *scouring* dibawah jaringan pipa bawah laut.

Budiarti (2016), telah melakukan penelitian mengenai pemodelan profil dua dimensi berbasis bahasa pemrograman Fortran. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui kedalaman maksimum, lebar dan laju propagasi *scouring* berdasarkan kondisi pipa meletak hingga memiliki gap.

Pebriantina (2016), menghitung kedalaman dan lebar *scouring* pada pipa gas transmisi SSWJ jalur pipa Labuhan Maringgai-Muara Bekasi yang akan dibentuk menjadi profil 2D. Tujuan penelitian untuk mengetahui hubungan diameter pipa dan e (*gap ratio*) kondisi *in-trench* yang mempengaruhi kedalaman, lebar dan laju propagasi. Penggerusan tidak terjadi ketika pipa terpendam sepenuhnya. Semakin besar diameter pipa akan berpengaruh terhadap waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *scouring* maksimum.

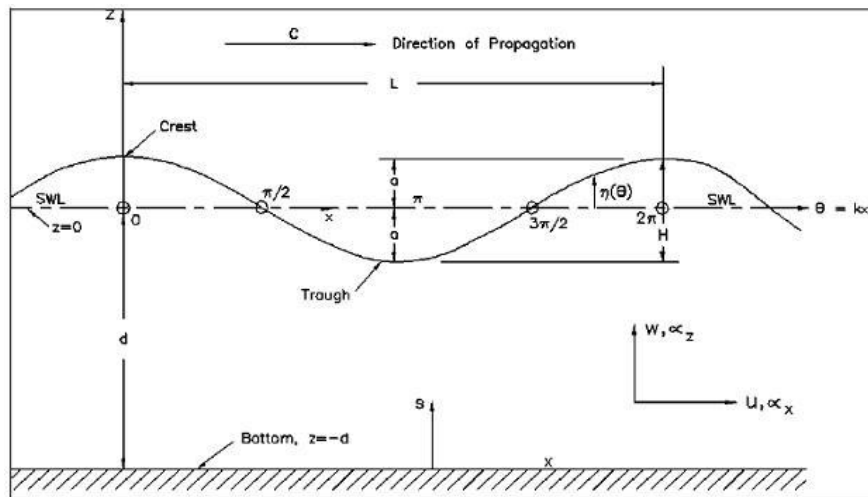
Zhou, et. al (2010) dalam jurnalnya An Experimental Study of Seabed responses Around A Marine Pipeline Under Wave and Current Condition menjelaskan bahwa terdapat pengaruh ukuran diameter tanah terhadap hasil *scouring*. Jenis aliran yang digunakan yaitu gelombang dan arus. Terdapat tiga jenis ukuran tanah yang berbeda.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Teori Gelombang Reguler

Gelombang merupakan aliran fluida dinamis yang mempunyai pola tersendiri dan dapat diformulasikan secara matematis. Untuk penyederhanaan perumusan matematis gelombang, yang dalam kondisi riilnya sangat kompleks, maka telah ditetapkan asumsi-asumsi. Perumusan yang paling sederhana yaitu dalam bentuk osilasi sinusoidal, seperti yang diperkenalkan oleh Airy (1845). Teori ini berasumsikan tinggi gelombang relatif kecil dibanding dengan panjangnya. Ketinggian gelombang tetap dan memiliki periode tunggal sehingga gelombang ini juga mempunyai spektrum tunggal.

Bentuk orbit partikel di perairan dangkal dan menengah berbentuk elips, sedangkan di perairan dalam berupa lingkaran. Gelombang linier mempunyai karakteristik kecuraman yang kecil, sedangkan gelombang-gelombang non linier mempunyai kecuraman lebih besar.



Gambar 2.1 Definisi istilah gelombang dasar, sinusoidal, progresif
(Coastal Engineering Manual part II Chapter 1) water wave mechanics

Dimana :

A : Amplitudo gelombang, $\frac{1}{2}$ jarak tegak dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

H : Tinggi gelombang, jarak tegak dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

L : Panjang gelombang , jarak mendatar dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

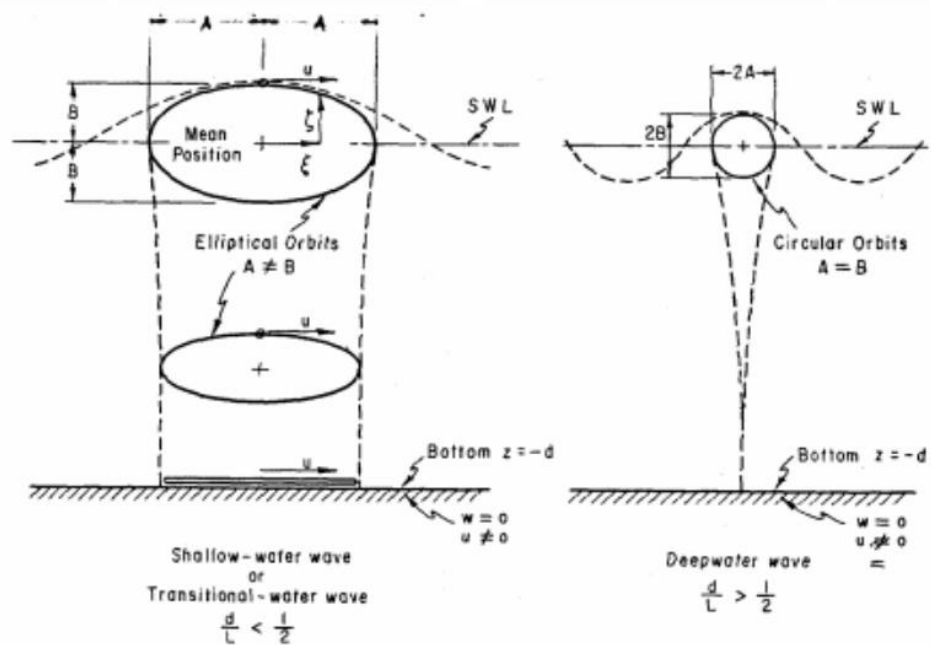
T : Periode gelombang, waktu yang ditempuh dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

C : Kecepatan gelombang (L/T)

d : Kedalaman air

ω : Frekuensi (rad) ($2\pi/T$)

k : Angka gelombang ($2\pi/L$)



Gambar 2.2 Pergerakan partikel air (*Shore Protection Manual* Vo. 1 p. 2-17)

Semakin dangkal perairan, orbital gelombang dapat mencapai dasar laut dan dapat mempengaruhi kondisi dasar laut. Sedangkan di laut dalam, orbital gelombang tidak sampai ke dasar laut dan tidak mempunyai pengaruh .

Untuk menghitung amplitudo gerakan orbital dari partikel air pada *seabed* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$a = \frac{H}{2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \quad (2.1)$$

dimana nilai z merupakan jarak vertikal dari muka air rata-rata ke dasar yaitu sama dengan $z = -d$. Nilai maksimum velocity pada dasar yaitu:

$$U_m = \frac{\pi H \cosh(k(z+d))}{T_w \sinh(kd)} \quad (2.2)$$

2.2.2 Scouring

Penyebab mendasar penggerusan di sekitar pipa adalah peningkatan kapasitas transportasi air yang melewati pipa, sementara sedimentasi terjadi daerah lain (Bijker and Leeuwestein, 1984).

Scouring merupakan salah satu fenomena yang banyak dialami oleh struktur bawah laut akibat serangan gelombang, arus, maupun kombinasi keduanya. Dapat juga disebabkan oleh elemen struktur yang berada di sekitar dasar laut. Gerusan lokal (*local scouring*) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen ditranspor lebih besar dari sedimen yang disuplai.

Faktor-faktor yang berhubungan dengan awal gerak butiran sedimen yaitu:

1. Kecepatan aliran dan diameter atau ukuran butiran
2. Gaya angkat yang lebih besar dari gaya berat butiran
3. Gaya geser kritis

Gerusan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu:

1. Gerusan umum (*general scour*)

Gerusan yang mengakibatkan dasar laut semakin dalam akibat interaksi antara aliran air dengan dasar laut. Hal ini menyebabkan sedimen terangkut.

2. Gerusan lokal (*local scour*)

Gerusan yang terjadi pada suatu daerah pada dasar akibat peningkatan energi dan turbulensi aliran karena gangguan struktur. Terdapat dua jenis gerusan lokal yaitu:

- *Clear Water Scour*

Clear-water scouring yaitu kondisi dimana sedimen tidak terangkut akibat aliran air. Aliran memiliki tegangan gesek lebih kecil dari tegangan kritisnya ($\theta < \theta_{cr}$)

- *Live Bed Scour*

Live-bed scouring yaitu kondisi dimana sedimen ikut terangkut oleh aliran air. Aliran memiliki tegangan gesek lebih besar dari

tegangan kritisnya ($\theta > \theta_{cr}$), dimana θ adalah *Shields Parameter Number*.

Shield Parameter Number (θ) merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan awal pergerakannya sedimen, dimana yang didefinisikan oleh Soulsby, (1997).

$$\theta_w = \frac{\frac{f_w}{2} \cdot U_m^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (2.3)$$

$$f_w = 1.39 \cdot \left(\frac{A}{z_o}\right)^{-0.52} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{U_m \cdot T_p}{2\pi} \quad (2.5)$$

$$z_o = \frac{2.5 \cdot d_{50}}{30} \quad (2.6)$$

Dimana:

s = *specisic gravity* sedimen dasar

g = percepatan gravitasi

d_{50} = *grain size*

f_w = bilangan non dimensional *wave friction*

z_o = *hydraulic roughness length*

Sedangkan θ_{cr} yaitu nilai kritis dari *Shields Parameter* yang memiliki persamaan :

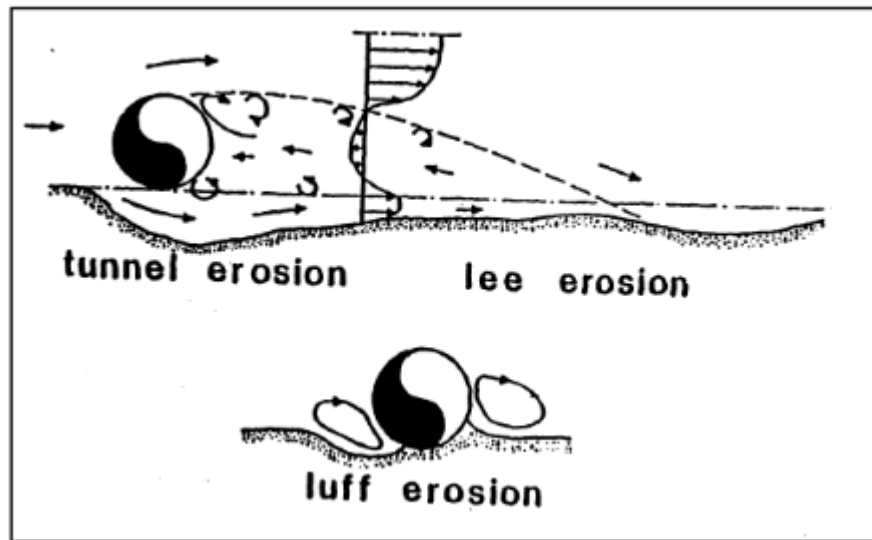
$$\theta_{cr} = \frac{0.24}{d_*} + 0.055(1 - \exp(-0.02d_*)) \quad (2.7)$$

dimana d_* merupakan bilangan non dimensional dari tanah

$$d_* = d_{50} \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right)^{1/3} \quad (2.8)$$

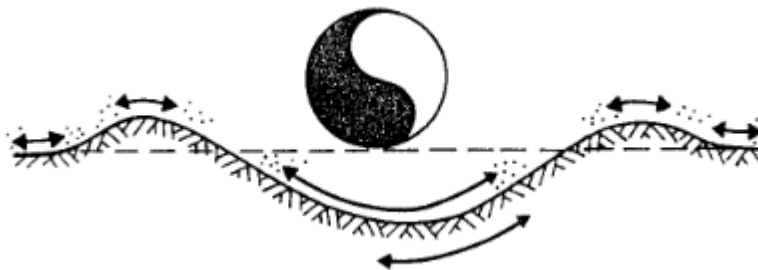
Leeuwestein (1984) menjelaskan tiga jenis gerusan local berdasarkan posisi relatif terhadap pipa yaitu *luff*, *lee* dan *tunnel erosion*. *Luff erosion* umumnya muncul hanya di hulu pipa. Jenis ini bukan menjadi masalah utama karena umumnya tidak mengakibatkan *free span*. *Lee erosion* terjadi setelah melewati pipa struktur dan merupakan pengaruh utama pada gerusan. Total kedalaman gerusan lebih besar akibat arus daripada gelombang. *Lee erosion* memperluas daerah hilir sehingga parit lebar di sekitar pipa. *Tunnel erosion* terjadi pada tahap awal proses penggerusan, kemudian terjadi *lee erosion*

selama fase pertumbuhan lubang gerusan. *Tunnel erosion* menyebabkan *lee erosion* menghasilkan *free span*.

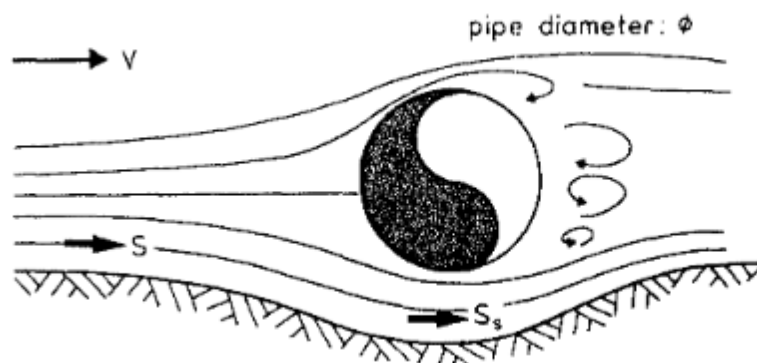


Gambar 2.3 Jenis *scouring* pipa Leeuwestein (1984)

Scouring terjadi karena gelombang dan arus maupun kombinasi keduanya. Aliran arus berpengaruh besar terhadap pembentukan lubang *scour*.



Gambar 2.4 *Scour* akibat gelombang (Bijker, 1986)



Gambar 2.5 *Scour* akibat arus (Bijker, 1986)

2.2.3 Keulegan-Carpenter Number (KC)

Keulegan-Carpenter Number disebut juga angka periode, yaitu bilangan non dimensional yang menghubungkan gaya drag dengan gaya inersia pada aliran yang berosilasi.

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (2.9)$$

Dimana :

U_m = kecepatan orbital maksimum partikel pada kondisi *undisturbed* di dasar

T = periode osilasi

D = skala panjang objek (seperti diameter pipa)

2.2.4 Kedalaman *Scouring*

Sumer dan Fredsøe (2002) membagi kedalaman *scouring* berdasarkan penyebabnya menjadi beberapa kelompok yaitu:

- Kedalaman *scouring* pada *steady currents*

Kjeldsen et al. (1973) membuat hubungan empiris antara kedalaman *scouring* (S), diameter pipa (D), dan kecepatan aliran (V) yang dapat di lihat pada persamaan dibawah ini.

$$S = 0,972 \left(\frac{V^2}{2g} \right)^{0,2} D^{0,8} \quad (2.10)$$

Untuk menjelaskan arus yang tepat akibat adanya pipa tergantung dengan jumlah berikut: diameter pipa (D), kecepatan aliran (V) yang dianggap sebagai kecepatan arus yang tidak terganggu di pusat, kecepatan kinematik fluida (v), kekasaran pipa (k_s) dan diameter material dasar laut (d). Dari analisa dimensi, bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* dinotasikan menjadi S/D dimana diikuti dengan parameter

$$\frac{S}{D} = f(k^*, Re, \theta) \quad (2.11)$$

dimana k^* merupakan kekasaran relatif

$$k^* = \frac{k_s}{D} \quad (2.12)$$

Re merupakan bilangan Reynolds

$$Re = \frac{V D}{\nu} \quad (2.13)$$

Bijker dan Leeuwestein (1985) membuat persamaan baru berdasarkan dengan persamaan 2.10 sebagai berikut

$$S = 0,929 \left(\frac{V^2}{2g} \right)^{0,26} D^{0,78} (d_{50})^{-0,04} \quad (2.14)$$

Dimana d_{50} merupakan diameter rata-rata butiran material dasar laut

- Kedalaman *scouring* pada gelombang reguler

Kedalaman *scouring* tak berdimensi (S/D) mempunyai hubungan dengan *Keulegan-Carpenter Number* (KC) yang dapat dilihat pada persamaan

$$\frac{S}{D} = 0.1 \sqrt{KC} \quad (2.15)$$

untuk kondisi *live bed* $\theta > \theta_{cr}$.

Etemad-Shahidi et al. (2010) memberikan usulan rumus untuk memprediksi kedalaman maksimum *scouring* dengan kondisi *live bed*.

$$\frac{S}{D} = 0.105 KC^{0.503} \exp(-0.284e/D) \text{ untuk } e/D \leq 0.145 \quad (2.16)$$

$$\frac{S}{D} = 0.024 KC^{0.763} \exp(-0.631e/D) \text{ untuk } e/D > 0.145 \quad (2.17)$$

dimana,

- S = kedalaman *scouring*
- KC = Keulegan-Carpenter Number
- D = diameter pipa
- e = jarak pipa terhadap dasar

- Kedalaman *scouring* pada gelombang ireguler

Sumer dan Fredsøe (1996) melakukan eksperimen mengenai pengaruh gelombang ireguler terhadap *scouring*. Spektrum yang digunakan berdasarkan elevasi air terukur untuk kondisi badai di Laut Utara yang disebut spectrum JONSWAP.

$$\frac{S}{D} = 0.1 \sqrt{KC} = 0.1 \sqrt{\frac{U_m T_p}{D}} \quad (2.18)$$

Nilai KC memiliki perbedaan dengan perhitungan gelombang regular dimana periode yang digunakan yaitu periode puncak.

$$U_m = \sqrt{2\sigma_U} \quad (2.19)$$

σ_U merupakan standar deviasi kecepatan orbital U pada *seabed*.

- Kedalaman *scouring* pada kondisi kombinasi gelombang dan arus

Sumer dan Fredsøe (1996) melakukan penelitian bahwa besar kecilnya kedalaman *scour* akibat arus dan gelombang, tergantung pada nilai KC dan $U_c/(U_c + U_m)$. U_c adalah *undisturbed current velocity* pada titik tengah pipa. Kedalaman *scouring* didapat dengan menggunakan persamaan

$$\frac{S}{D} = \frac{S_{cur}}{D} F \quad (2.20)$$

dimana S_{cur} merupakan kedalaman *scour* akibat arus saja dan F adalah fungsi dari *Keulegan-Carpenter number* (KC) dan perbandingan kecepatan arus dengan kombinasi kecepatan arus dan gelombang $U_c/(U_c + U_w)$. Untuk mencari nilai F terdapat batasan-batasan tertentu yaitu

- Untuk $0 < U_c/(U_c + U_m) \leq 0.7$

$$F = \frac{5}{3} (KC)^a \exp(2.3b) \quad (2.21)$$

- Untuk $0.7 < U_c/(U_c + U_m) \leq 1$

$$F = 1 \quad (2.22)$$

Koefisien a dan b dapat dihitung apabila nilai $0 < U_c/(U_c + U_w) \leq 0,7$. Berikut adalah rumus yang digunakan untuk menghitung koefisien a dan b .

Untuk $0 < U_c/(U_c + U_m) \leq 0.4$

$$a = 0.557 - 0.912 \left(\frac{U_c}{U_c + U_m} - 0.25 \right)^2 \quad (2.23)$$

$$b = -1.14 + 2.24 \left(\frac{U_c}{U_c + U_m} - 0.25 \right)^2 \quad (2.24)$$

Untuk $0.4 < U_c/(U_c + U_m) \leq 0.7$

$$a = -2.14 \left(\frac{U_c}{U_c + U_m} \right) + 1.46 \quad (2.25)$$

$$b = 3.3 \left(\frac{U_c}{U_c + U_m} \right) - 2.5 \quad (2.26)$$

- Kedalaman *scouring* pada kondisi *shoaling*

Cevik dan Yuksel (1999) melakukan penelitian mengenai efek kondisi *shoaling* terhadap kedalaman *scouring*. Kedalaman *scouring* akibat *shoaling* lebih besar daripada akibat dari gelombang dengan kejadian yang sama.

$$\frac{S}{D} = 0,11 KC^{0,45} \quad (2.27)$$

Mao (1986) mengembangkan riset mengenai profil lubang *scour* dan menemukan formula sebagai berikut :

$$h(x) = \begin{cases} \epsilon + \frac{D}{2} + \frac{S_d}{2} (1 + \cos \left(2\pi \frac{x}{w} \right)) & \text{untuk } |x| < \frac{w}{2} \\ \epsilon + \frac{D}{2} & \text{untuk } |x| > \frac{w}{2} \end{cases} \quad (2.28)$$

Dimana :

$h(x)$ = jarak vertikal dari titik tengah diameter pipa bagian bawah lubang *scour*

w = lebar *scour*
 € = jarak antara pipa dan dasar laut

2.2.5 Lebar *Scouring*

Sumer dan FredsØe (1990) telah melakukan penelitian mengenai perhitungan lebar *scouring* dapat menggunakan rumus:

$$\frac{w}{D} = 0.35 KC^{0.65} \quad (2.29)$$

Nilai w merupakan lebar *scouring* yang diukur dari diameter tengah pipa hingga kedalaman maksimum *scouring* di bawah pipa.

2.2.6 Periode *Scouring* (*time scale*)

Laju propagasi *scouring* merupakan proses terjadinya *scouring* tiap waktu. Waktu yang dibutuhkan untuk mengembangkan penggerusan hingga mencapai keseimbangan disebut *time scale* :

$$S_t = S \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{T} \right) \right) \quad (2.30)$$

Dimana

S = kedalaman *scouring* maksimum

t = waktu yang digunakan

T = didefinisikan *time scale*

Nilai T* untuk gelombang yaitu:

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (2.31)$$

2.2.7 Pemodelan Fisik

Konsep dari pemodelan fisik yaitu membuat kembali sebuah objek atau fenomena dari prototipe dengan penyederhanaan menggunakan skala. Oumeraci dan Schüttrumpf (1999) dalam Husrin (2015) mendefinisikan:

“Model fisik adalah penyederhanaan dan pembuatan kembali sebuah objek menjadi lebih kecil menyerupai prototipe-nya dimana proses-proses

aliran dan karakteristiknya diteliti sedemikian rupa untuk mencari solusi permasalahan di bidang hidrodinamika dan hidraulika”

Eksperimen pada proses *scour* menggunakan model yang telah diperkecil dari ukuran struktur sebenarnya dan ditempatkan pada dasar/*seabed* di sebuah fasilitas dimana gelombang dan atau arus di bangkitkan dengan kondisi yang terkendali.

2.2.7.1 Syarat-syarat Keserupaan

Model yang dibuat memiliki keserupaan secara geometrik, kinematik, dan dinamik dengan prototipe. Masing-masing parameter memiliki skala tersendiri dan besarnya tidak sama.

a. Keserupaan Geometri

Keserupaan geometri adalah keserupaan dimana ukuran panjang model dan prototipe sebanding dalam segala arah sehingga didapat bentuk yang sama. Hubungan parameter model dan prototipe ditunjukkan dengan rasio variabel yang sama.

$$N_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.32)$$

Dimana

N_L : skala L antara prototipe dan model

L_p : nilai L pada prototipe

L_m : nilai L pada model

Perbandingan dari luasan (N_A) dan volume (N_v) yaitu :

$$N_A = N_L^2 = \frac{L_p^2}{L_m^2} \quad (2.33)$$

$$N_v = N_L^3 = \frac{L_p^3}{L_m^3} \quad (2.34)$$

b. Keserupaan Kinematik

Keserupaan kinematik mengacu pada pergerakan partikel fluida atau solid dari sebuah sistem. Pergerakan dimaksudkan sebagai perubahan dimensi panjang terhadap waktu. Keserupaan ini tercapai bila rasio antara komponen-komponen dari seluruh pergerakan vektorial untuk prototipe

dan model adalah sama untuk setiap saat. Seperti yang dikatakan oleh Langhaar “*Gerak dua sistem adalah, serupa secara kinematis, kalau partikel-partikel yang homolog terletak di titik-titik yang homolog pada saat-saat yang homolog*”. Aspek waktu di alam (t_p) dan di model (t_m) harus sejalan.

$$N_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (2.35)$$

Untuk kecepatan (N_v) dan Percepatan (N_a) ditentukan :

$$N_v = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p/t_p}{L_m/t_m} = \frac{L_p/L_m}{t_p/t_m} = \frac{N_L}{N_t} \quad (2.36)$$

$$N_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{L_p/t_p^2}{L_m/t_m^2} = \frac{L_p/L_m}{(t_p/t_m)^2} = \frac{N_L}{N_t^2} \quad (2.37)$$

c. Kekerupaan Dinamik

Kekerupaan dinamik merupakan kekerupaan gaya-gaya yang mempengaruhi antara model dan prototipe. Kekerupaan dinamik secara matematik dijelaskan oleh hukum Newton II, bahwa gaya inersia sebanding dengan sejumlah vektor dari gaya gravitasi, gaya tegangan permukaan, gaya gesek atau kekentalan, gaya kompresi elastik, dan gaya tekanan.

Secara matematis dinyatakan dalam :

$$\vec{F}_i = \vec{F}_g + \vec{F}_\mu + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_E + \vec{F}_p \quad (2.38)$$

Dimana :

\vec{F}_i : gaya inersia

\vec{F}_g : gaya gravitasi

\vec{F}_μ : gaya gesek

\vec{F}_σ : gaya tegangan permukaan

\vec{F}_E : gaya kompresi elastik

\vec{F}_p : gaya tekanan

Sehingga kekerupaan dinamik pada prototipe dan model yaitu:

$$\frac{(\vec{F}_i)_p}{(\vec{F}_i)_m} = \frac{(\vec{F}_g + \vec{F}_\mu + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_E + \vec{F}_\rho)_p}{(\vec{F}_g + \vec{F}_\mu + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_E + \vec{F}_\rho)_m} \quad (2.39)$$

Pada hampir seluruh masalah teknik pantai (dan sekitar 90% dari seluruh masalah hidrolis), gaya akibat tekanan permukaan dan kompresi elastis biasanya kecil dan dapat diabaikan Warnock (1950) dalam Husrin (2015). Kekerupaan dinamik dianggap terpenuhi jika Kekerupaan Reynolds dan Froude terpenuhi.

2.2.7.2 Hukum Kekerupaan

a. Kekerupaan Reynolds

Dalam kekerupaan Reynolds ini gaya yang diperhitungkan yaitu gaya inersia dan gaya gesekan akibat kekentalan.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya friksi}} \\ &= \frac{\rho L^2 v^2}{\mu v L} = \frac{\rho L v}{\mu} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Kekerupaan terjadi jika terdapat kesamaan angka Reynold antara model dengan prototipe,

$$\left(\frac{\rho L v}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho L v}{\mu} \right)_m \quad (2.41)$$

b. Kekerupaan Froude

Gaya gravitasi dan gaya inersia dianggap dominan pada kekerupaan Froude:

$$\begin{aligned} N_{Fi} &= N_{Fg} \\ \frac{v_p}{(g_p L_p)^{1/2}} &= \frac{v_m}{(g_m L_m)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Suku $F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ disebut dengan Bilangan Froude

2.2.7.3 Analisa Dimensi

Analisa dimensi yaitu pengubahan variabel-variabel yang mempengaruhi gejala fisik yang ada menjadi variabel tak berdimensi. Variabel-variabel dapat dikelompokkan menjadi:

1. Variabel fisik yang akibat gerak benda dalam fluida seperti gaya tegangan geser, dan lain-lain
2. Variabel geometri seperti ukuran panjang, bentuk
3. Variabel gerak benda seperti kecepatan, percepatan
4. Variabel sifat fluida seperti viskositas, massa jenis, tekanan,
5. Variabel sifat benda seperti modulus elastisitas, massa jenis benda

Terdapat dua metode analisa dimensi yaitu:

a. Metode Reyleigh

Misal menyatakan suatu variable penting α_1 , sebagai fungsi dari variable bebas lainnya $\alpha_2, \alpha_3, \dots \alpha_n$ dalam bentuk :

$$\alpha_1 = f(\alpha_2, \alpha_3, \dots \alpha_n)$$

$$\text{atau } f(\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n) = 0$$

b. Metode Pi Buckingham

Langkah-langkah untuk menganalisa yaitu :

1. Tulis seluruh variabel yang berpengaruh
2. Pilih satu set dimensi primer, r dari variabel-variabel diatas
3. Tentukan jumlah suku π dengan mengurangi r dengan jumlah variabel
4. Pilih variabel yang diulang m yang jumlahnya sama dengan jumlah minimum dimensi primer yang digunakan
5. Dari variable-variabel dipilih (n) dan parameter yang diulang (m) , untuk $m = r$ dapatkan grup-grup tak berdimensi, dalam hal ini akan ada $(n - m)$ grup tanpa dimensi
6. Verifikasi. Setiap variabel dari variable-variabel dasar berada setidaknya satu dari suku $\pi_1, \pi_2, \dots \pi_n$

2.2.8 *Specific Gravity Tanah*

Berat jenis (*specific gravity*) tanah adalah angka perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air suling pada volume yang sama dan suhu tertentu.

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 + W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (2.43)$$

dimana :

W_1 = berat piknometer (gram)

W_2 = berat piknometer dan tanah kering (gram)

W_3 = berat piknometer, tanah, dan air (gram)

W_4 = berat piknometer dan air (gram)

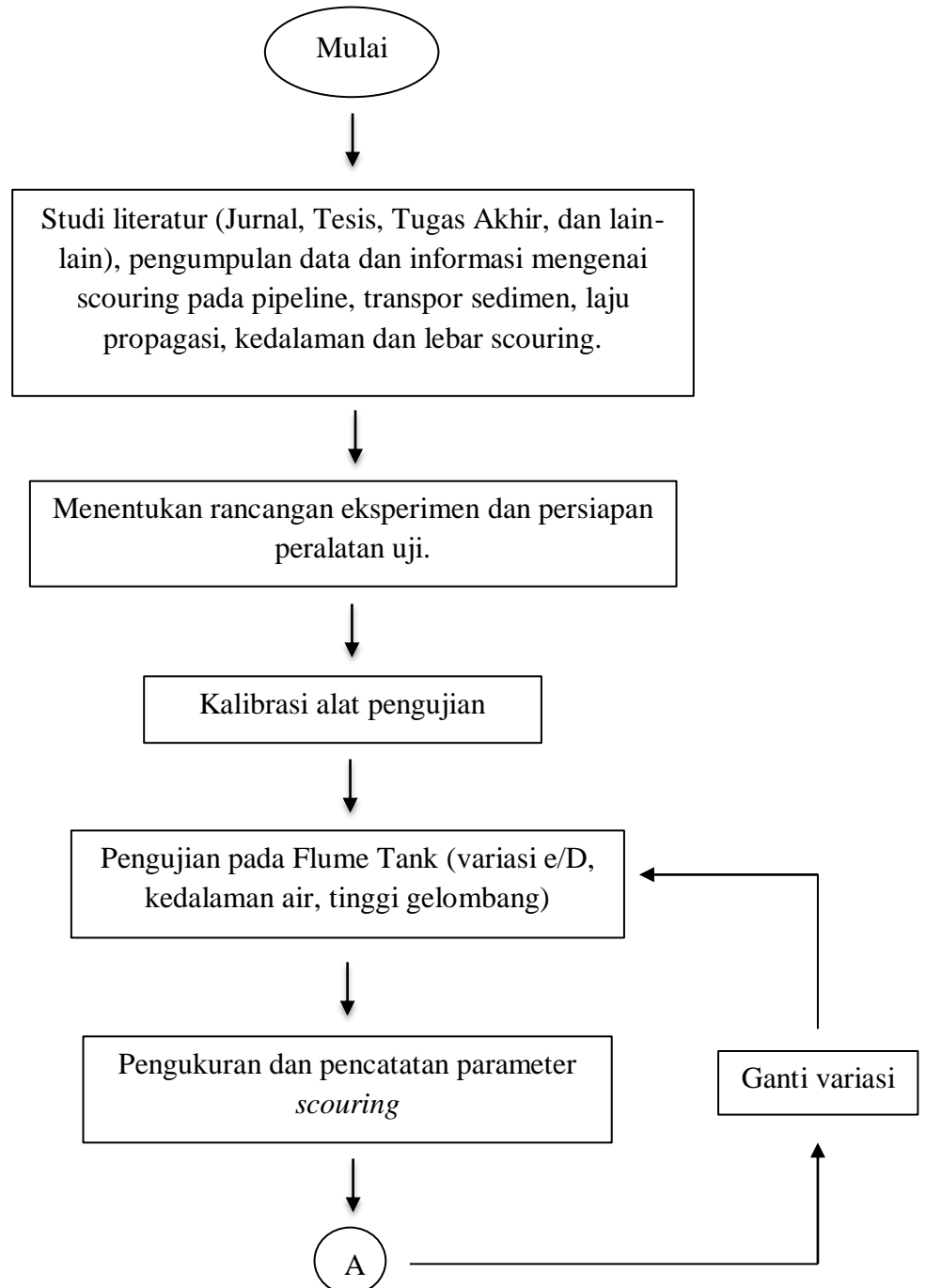
$$G_{s(\text{at } 27^\circ\text{C})} = G_{s(\text{at } T1^\circ\text{C})} \times A \quad (2.44)$$

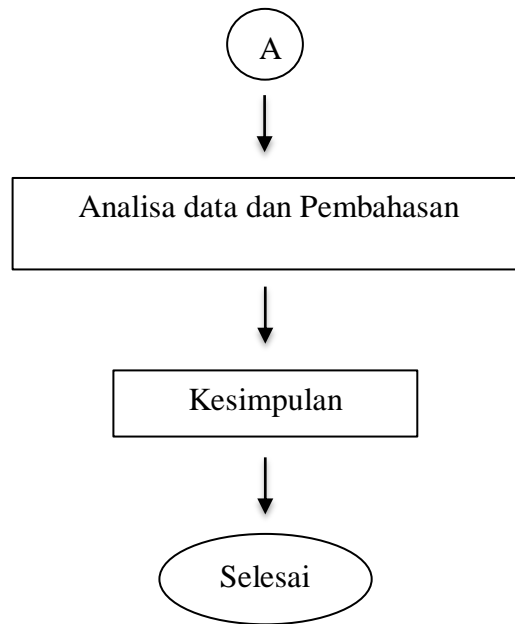
Dengan A merupakan faktor koreksi sebesar 0,9986

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur pengerjaan Tugas Akhir (TA) ini adalah sebagai berikut :





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan yaitu:

3.2.1 Studi literatur dan pengumpulan data

Sebelum melakukan pengujian, terlebih dahulu dilakukan studi literatur. Hal ini dilakukan untuk memahami teori-teori dan penelitian terdahulu yang berhubungan dengan pemecahan masalah. Sumber literatur didapatkan dari jurnal, buku, Tugas Akhir yang telah dilakukan, Tesis dan lain sebagainya. Penelitian dilakukan dengan eksperimen model fisik dua dimensi.

3.2.2 Menentukan rancangan eksperimen dan persiapan peralatan uji.

Rancangan model uji berisi variabel-variabel apa saja yang digunakan saat pengujian. Diantaranya tinggi gelombang yang dibangkitkan, periode, jenis gelombang, dan sebagainya. Model yang digunakan yaitu pipa PVC yang berdiameter 1.5 in. dengan panjang 25 cm. Kedua ujung pipa di mampatkan pada dinding *flume tank*. Gelombang yang digunakan yaitu gelombang regukar. Kondisi pipa

terletak di permukaan dasar dan terbenam dalam dasar. Untuk ukuran tanah yaitu diameter d_{50} .

Tabel 3.1 Variasi pada Eksperimen

Percobaan ke-	T (s)	d (cm)	H (cm)	Kondisi Peletakkan
1	1	50	11	Meletak ($e/D = 0$)
2	1	50	13	Meletak ($e/D = 0$)
3	1	50	15	Meletak ($e/D = 0$)
4	1	40	11	Meletak ($e/D = 0$)
5	1	40	13	Meletak ($e/D = 0$)
6	1	40	15	Meletak ($e/D = 0$)
7	1	40	11	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.05$)
8	1	40	13	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.05$)
9	1	40	15	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.05$)
10	1	40	11	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.075$)
11	1	40	13	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.075$)
12	1	40	15	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.075$)
13	1	40	11	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.1$)
14	1	40	13	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.1$)
15	1	40	15	<i>In-Trench</i> ($e/D = -0.1$)

a. Peralatan Eksperimen *Scouring*

Peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

1. *Flume tank*

Flume tank pada Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS berukuran 20 m x 2,3 m x 2,5 m (panjang, lebar, tinggi). Pembangkit angin dengan sistem blower kecepatan maksimum 10 m/s. Pembangkit arus dengan sistem impeller dengan kecepatan 2,5 hingga 10 cm/s. Pembangkit gelombang sistem plunyer dengan karakteristik gelombang reguler dan irreguler maksimum 30 cm, periode 0,5 - 3,0 detik, dan kedalaman air maksimum 80 cm.

Dalam eksperimen ini dibutuhkan lebar *flume tank* 25 cm dan pembangkit gelombang reguler. Kedalaman air pada model uji 50 cm dan 40 cm.

2. *Wave Probe*

Wave probe merupakan alat perekam tinggi gelombang dimana elektroda yang tercelup air sesuai fluktuasi permukaan air. Dalam penelitian ini *wave probe* yang digunakan berjumlah dua buah yang diletakkan sebelum dan sesudah model uji.

3. Kamera perekam

Setiap proses eksperimen akan direkam menggunakan kamera. Fungsinya yaitu untuk mengetahui pergerakan *scouring* secara visual dan disesuaikan dengan waktu yang terekam. Dengan begitu akan didapat waktu penjaran *scouring*.

4. Penggaris

Setelah *running* selesai selalu dilakukan pengukuran kedalaman dan lebar *scouring* untuk mengetahui perubahan yang terjadi.

b. Peralatan Uji Tanah

Pengujian tanah dibedakan menjadi dua yaitu uji untuk mengetahui nilai *specific gravity* tanah dan untuk mengetahui ukuran d_{50} yang akan digunakan dalam perhitungan empiris. Pengujian dilakukan dengan dua sampel tanah dengan jenis yang sama. Peralatan yang digunakan dalam proses pengujian tanah untuk mencari *specific gravity* adalah :

1. Neraca
2. Cawan
3. Oven
4. Piknometer
5. Termometer
6. Botol berisi aquades

Peralatan uji ayakan untuk mendapatkan ukuran d_{50} tanah adalah :

1. Ayakan berbagai ukuran lubang dengan nomor ayakan 4 yang menunjukkan ukuran diameter besar hingga ayakan nomor 200 ukuran diameter paling kecil.
2. Neraca
3. Lengser sebagai tempat sampel tanah
4. Sikat pembersih ayakan
5. Sekop untuk memasukkan sampel tanah ke plastik
6. Plastik

3.2.3 Pengujian Tanah

Pengujian Tanah dibagi menjadi dua yaitu uji *specific gravity* dan uji ayaka.

a. Uji *Spesific Gravity*

Cawan kosong sebelum di tambahkan sampel tanah, terlebih dahulu ditimbang menggunakan neraca untuk mengetahui berat bersih tanah. Sampel tanah dikeringkan dalam oven selama 24 jam lalu dianginkan. Cuci piknometer dan keringkan. Timbang berat piknometer kosong catat sebagai W1. Timbang berat piknometer yang berisi air dan catat sebagai W4. Tambahkan sampel tanah kedalam piknometer yang kosong hingga mencapai 1/3 volume lalu timbang kembali dan catat sebagai W2. Tambahkan aquades kedalam piknometer sehingga isi piknometer menjadi 2/3 bagian dan catat sebagai W3. Vakum agar gelembung udara yang masih tertinggal pada tanah. Setelah diangkat, rendam pada air dan ukur suhu.

b. Uji Ayakan

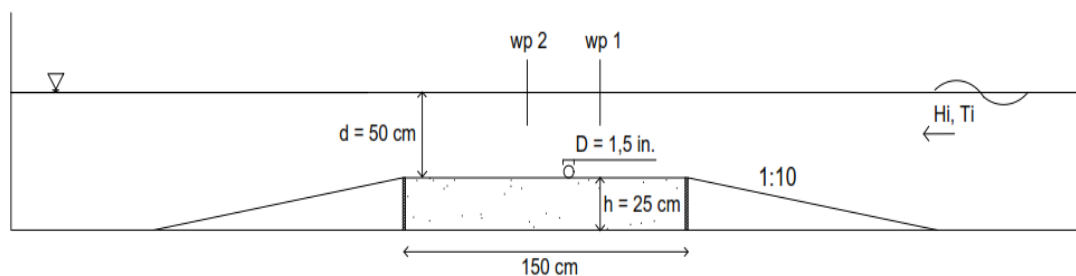
Sampel tanah dikeringkan pada oven. Pengayakan sampel tanah dimulai dengan ayakan yang berdiameter besar hingga ke kecil. Sampel yang tidak lolos tiap ayakan dicatat sesuai nomor ayakan.

3.2.4 Kalibrasi alat uji

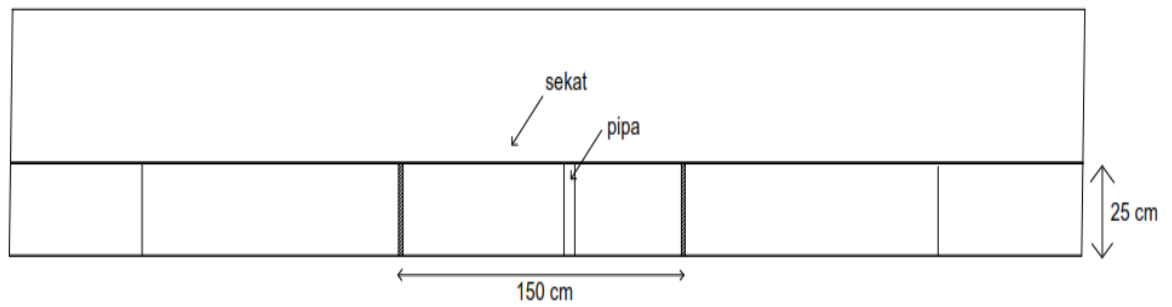
Kalibrasi dilakukan pada *wave probe*. Fungsi kalibrasi pada *wave probe* yaitu mencari hubungan antara perubahan elektrode *wave probe* yang tercelup dalam air dengan perubahan voltase yang tercatat dalam perekam. Pencatatan awal posisi *wave probe* dianggap menjadi titik nol dan dilanjutkan dengan merekam penurunan dan kenaikan *wave probe* setiap 5 cm sebanyak tiga kali. Hasil kalibrasi akan disesuaikan dengan hasil rekaman gelombang saat proses pengujian untuk mendapatkan tinggi gelombang sebenarnya.

3.2.5 Pengujian *scouring*

Eksperimen dilakukan di flume tank Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan dengan tiga variasi tinggi gelombang, sedangkan untuk periode gelombang sama. Kondisi pipa meletak pada dasar dan *in-trench*. *Wave probe* dipasang sesudah dan sebelum pipa. Sebelumnya dilakukan pengujian awal untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan agar terjadi *scouring*, yang nantinya akan dijadikan acuan waktu eksperimen. Pengamatan dilakukan dari samping. Pengujian dilakukan di kedalaman 50 cm terlebih dahulu. Kemudian dilanjutkan di kedalaman 40 cm dengan posisi pipa dan kondisi *flume* yang sama.



Gambar 3.2 Skenario eksperimen tampak samping



Gambar 3.3 Skenario eksperimen tampak atas

3.2.6 Pengukuran dan pencatatan parameter *scouring*

Pengujian dilakukan dengan waktu 25 menit untuk setiap variasi eksperimen dimana *scouring* telah mencapai maksimum. Interval waktu pengukuran yaitu setiap 5 menit.

3.2.7 Analisa data dan Pembahasan

Hasil pengujian pada flume tank divalidasi menggunakan perhitungan empiris dengan cara membandingkan kriteria yang terdapat pada pengujian dengan rumus empiris yang digunakan. Bila terdapat kesamaan antara kriteria pengujian dan rumus empiris, maka pengujian dianggap mempunyai validitas tinggi. Pencatatan nilai kedalaman *scouring* maksimum dan lebar *scouring* ditampilkan dengan menggunakan parameter non dimensional. Untuk laju propagasi di tampilkan dengan grafik perubahan kedalaman *scouring* tiap interval waktu 5 menit selama 25 menit.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan untuk mengetahui kedalaman dan lebar *scouring* berdasarkan tinggi gelombang (H), periode gelombang (T), kedalaman air (d), kondisi pipa (meletak dan *in-trench*), dan jenis gelombang (reguler). Pengamatan *scouring* dan pencatatan data gelombang dilakukan setiap 5 menit hingga mencapai kondisi kedalaman maksimum. Hasil eksperimen akan dibandingkan untuk mengetahui pengaruh tiap variasi terhadap kedalaman maksimum dan lebar *scouring*.

4.1 Data Tanah

Data tanah didapatkan dari pengujian sampel tanah di laboratorium mekanika tanah. Pengujian berfungsi untuk mengetahui jenis dan ukuran d_{50} tanah.

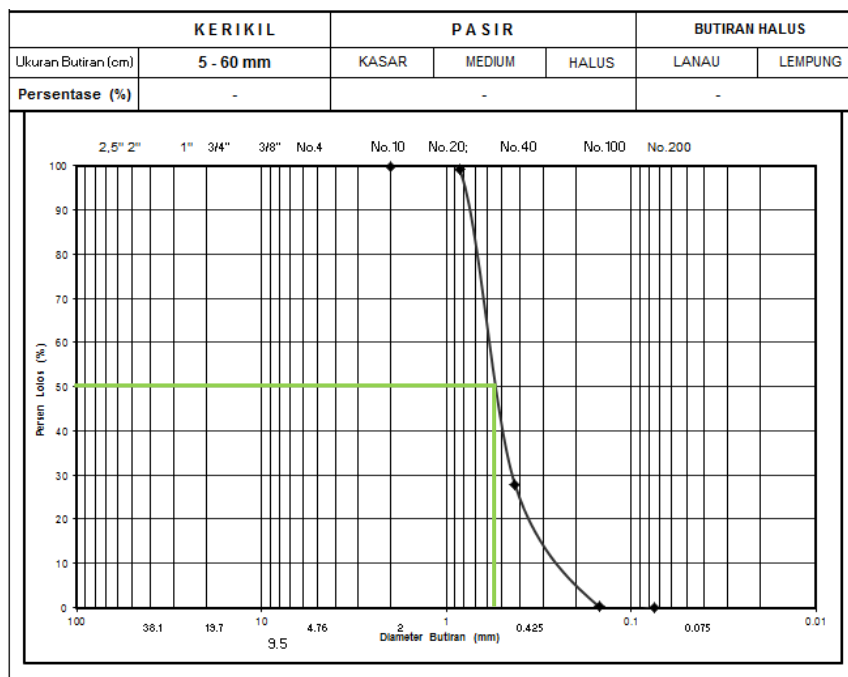
Tabel 4.1 Hasil uji *specific gravity*

Nomor Cawan	144	48
Berat cawan kosong (gr)	50.1	50.8
Berat cawan + tanah basah (gr)	142.4	102.1
Berat cawan +tanah kering oven (gr)	141.7	101.7
Nomor Piknometer	23	62
Berat piknometer kosong (gr)	87.6	125.8
Berat piknometer + tanah kering (gr)	179.2	176.7
Berat piknometer + air (gr)	336.1	374.3
Berat pikno + air + tanah kering	395.5	407.4
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
Material	26.5	26.5
Air	27.7	27.7
Specific Gravity	2.8	2.8

Tabel 4.2 Analisa Pembagian Butir (Gradasi)

A. Tabel Analisa Pembagian Butir (Gradasi):					
Berat tanah kering		=		500	gr
Berat mangkok		=		13.93	gr
Sieve		Berat Tertahan		% Tertahan	% Lolos
#	Ø (mm)	(gr)			
2.5"	63				
1 1/2"	37.5				
1"	25.4				
3/4"	19.1				
3/8"	9.5				
4	4.76				
10	2.00	14.34	0.41	0.08	99.92
20	0.85	16.91	2.98	0.60	99.32
40	0.425	371.44	357.51	71.50	27.82
100	0.149	152.02	138.09	27.62	0.20
200	0.075	14.54	0.61	0.12	0.08
Pan					
			499.60	99.92	

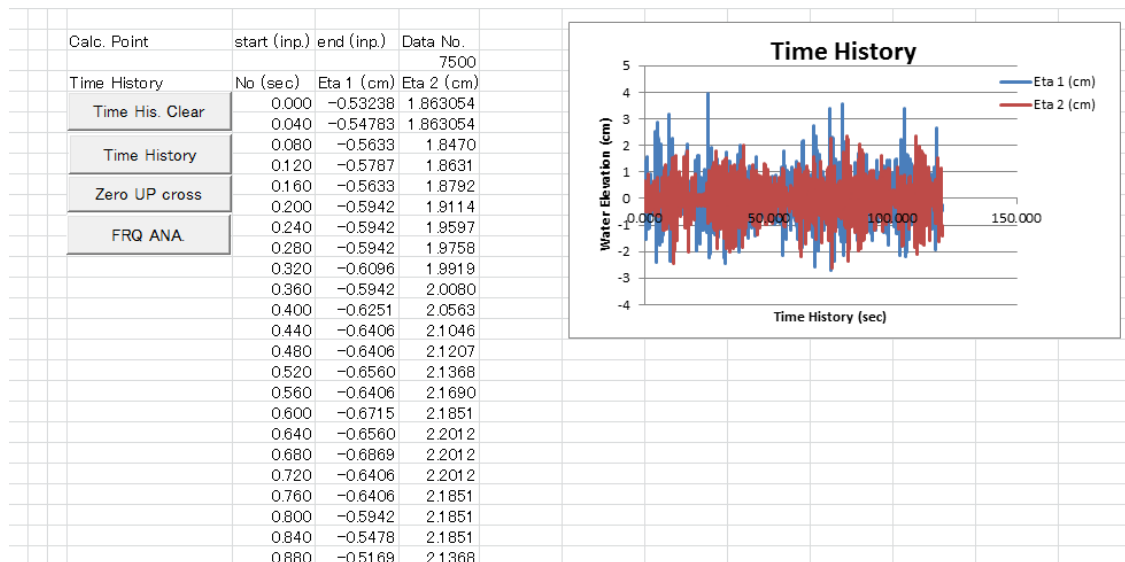
Setelah diketahui jumlah tanah yang tertahan pada tiap ayakan, plot pada grafik pembagian butir tanah seperti di bawah ini. Ditarik garis dari d_{50} atau 50% tanah lolos ayakan untuk mengetahui diameter butiran tanah yaitu 0.55 mm.



Gambar 4.1 Grafik Pembagian Butir Tanah (Gradasi)

4.2 Data Gelombang

Data gelombang yang digunakan dalam analisa *scouring* di sekitar pipa yaitu hasil rekaman *wave probe* berupa *time history* (.TMH) yang dicatat setiap 5 menit. Kemudian diolah menggunakan macro excel refana agar terlihat ukuran tegangan yang direkam. Kumpulan data gelombang dan hasil kalibrasi *wave probe* diolah menggunakan software Anaware. Nilai yang didapat yaitu tinggi gelombang (H) dan periode gelombang (T). *Time History*.



Gambar 4.2 Excel Macro Refana

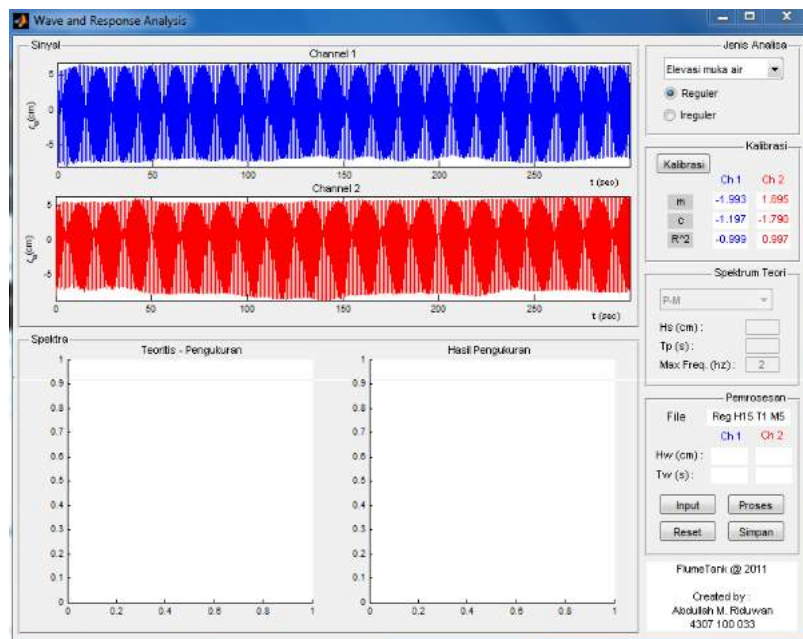
Nilai eta 1 merupakan nilai tegangan yang terekam oleh *wave probe* 1 yang terletak sebelum pipa. Sedangkan eta 2 yaitu rekaman tegangan *wave probe* 2 yang terletak setelah pipa. Penyimpanan hasil olahan excel disimpan pada folder tersendiri berdasarkan format yang sesuai dengan software Anaware. Pencatatan kalibrasi berdasarkan posisi awal *wave probe* kemudian dinaikkan dan diturunkan pada jarak tertentu.

Tabel 4.3 Format Penamaan File Kalibrasi

No	Nama File	Uraian
1	U4	Probe dinaikkan 15 cm
2	U3	Probe dinaikkan 10 cm
3	U2	Probe dinaikkan 5 cm
4	0	Probe pada posisi awal

No	Nama File	Uraian
5	D2	Probe diturunkan 5 cm
6	D3	Probe diturunkan 10 cm
7	D4	Probe diturunkan 15 cm

Penggunaan software Anaware diawali dengan memilih jenis gelombang yang digunakan. Kemudian masukkan data kalibrasi dan data gelombang pada kolom yang tersedia lalu proses hingga mendapatkan hasil tinggi gelombang dan periode gelombang.



Gambar 4.3 Software Anaware

Tabel 4.4 Tinggi dan periode gelombang

Case	H (cm)	T (s)
1	11	1.0
2	13	1.0
3	15	1.0

Variasi gelombang diatas digunakan dalam eksperimen di tiap kondisi pipa meletak dan *in-trench* dan kedalaman yang berbeda.

4.3 Hasil Eksperimen

Hasil eksperimen ditampilkan berdasarkan variasi kondisi peletakkan pipa (e/D). Tiap kondisi peletakkan terdapat tiga variasi tinggi gelombang dengan periode yang sama.

4.3.1 Kondisi Pipa Meletak ($e/D = 0$)



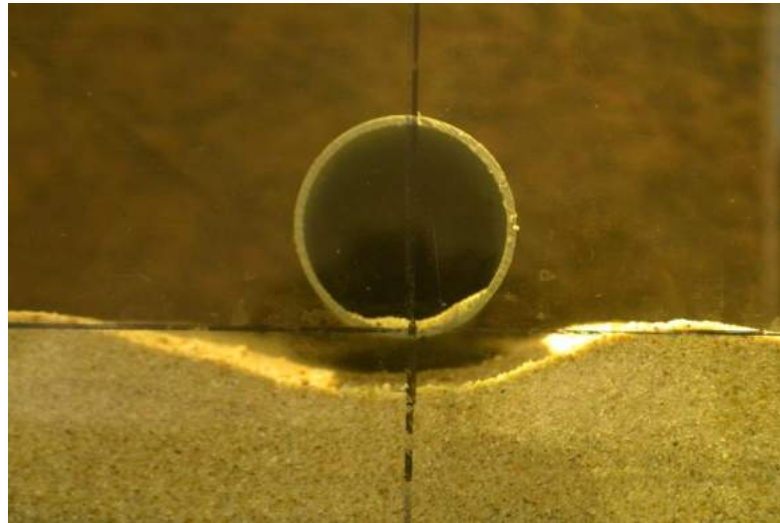
Gambar 4.4 Kondisi awal pipa meletak ($e/D = 0$)

Pada kondisi pipa meletak terdapat variasi tambahan pada kedalaman air yaitu 50 cm dan 40 cm. Tinggi gelombang untuk tiap kedalaman sebesar 11 cm, 13 cm, dan 15 cm. Kedalaman dan lebar *scouring* maksimum terjadi setelah 25 menit. Nilai kedalaman (S) dan lebar (w) *scouring* masing – masing ketinggian gelombang yaitu :

Tabel 4.5 Kedalaman dan lebar *scouring* kondisi $e/D = 0$

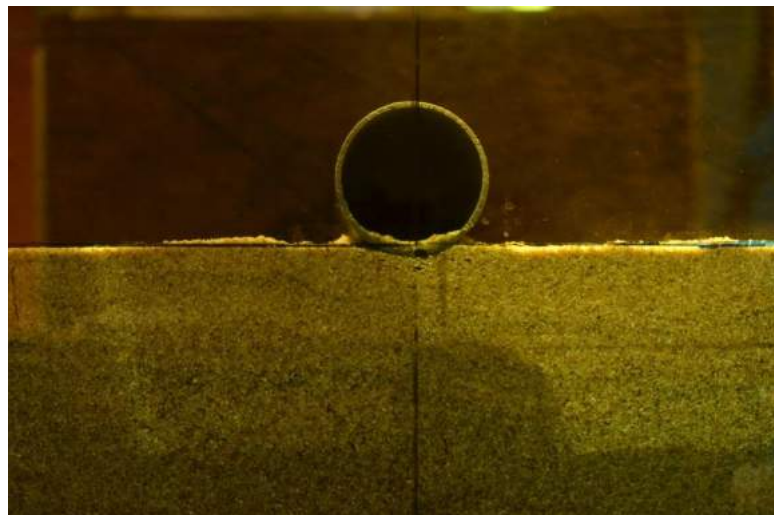
H (cm)	d (cm)	S (cm)	w (cm)
11	50	0.487	3.709
13	50	0.517	4.259
15	50	0.700	5.900
11	40	0.696	4.424
13	40	0.922	6.420
15	40	0.989	8.314

Scouring terbesar diantara 6 variasi diatas yaitu pada kondisi tinggi gelombang 15 cm dan kedalaman air 40 cm dengan nilai $S = 0.989$ cm dan $w = 8.314$ cm.



Gambar 4.5 Hasil *scouring* kondisi pipa meletak ($e/D=0$), tinggi selombang (H) = 15 cm

4.3.2 Kondisi Pipa *In-Trench* ($e/D = -0.05$)



Gambar 4.6 Kondisi awal pipa *in-trench* ($e/D = -0.05$)

Pada kondisi ini, pipa di pendam 0.2 cm dengan tinggi gelombang yang sama dengan sebelumnya yaitu 11 cm, 13 cm, dan 15 cm. Dalam kondisi ini tidak di variasikan terhadap kedalaman air yaitu 40 cm. Waktu yang digunakan untuk mencapai kondisi maksimum yaitu 25 menit. Berikut hasil eksperimen tiap ketinggian gelombang

Tabel 4.6 Kedalaman dan lebar *scouring* kondisi $e/D = -0.05$

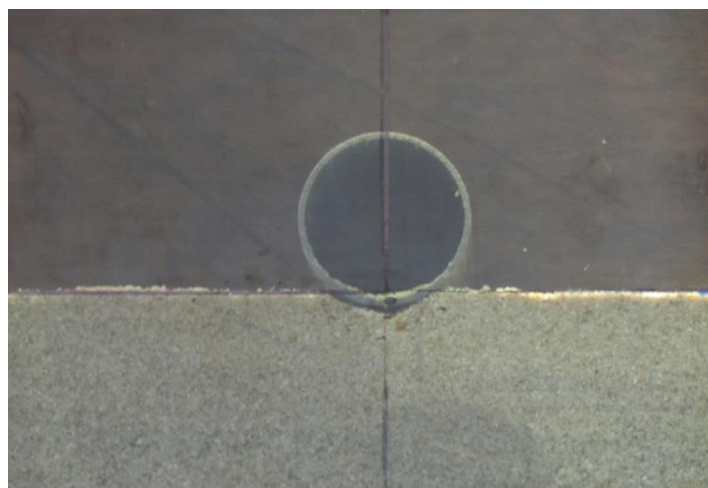
H (cm)	d (cm)	S (cm)	w (cm)
11	40	0.390	4.150
13	40	0.686	5.600
15	40	0.756	7.300

Kedalaman dan lebar *scouring* terbesar yaitu pada ketinggian gelombang 15 dengan nilai $S = 0.756$ cm dan $w = 7.300$ cm.



Gambar 4.7 Hasil *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D = -0.05$), tinggi gelombang (H) = 15 cm

4.3.3 Kondisi Pipa *In-Trench* ($e/D = -0.075$)



Gambar 4.8 Kondisi pipa awal *in-trench* ($e/D = -0.075$)

Pipa di pendam sedalam 0.3 cm. Dalam kondisi ini tidak di variasikan terhadap kedalaman air. Berikut hasil eksperimen tiap ketinggian gelombang :

Tabel 4.7 Kedalaman dan lebar *scouring* kondisi $e/D = -0.075$

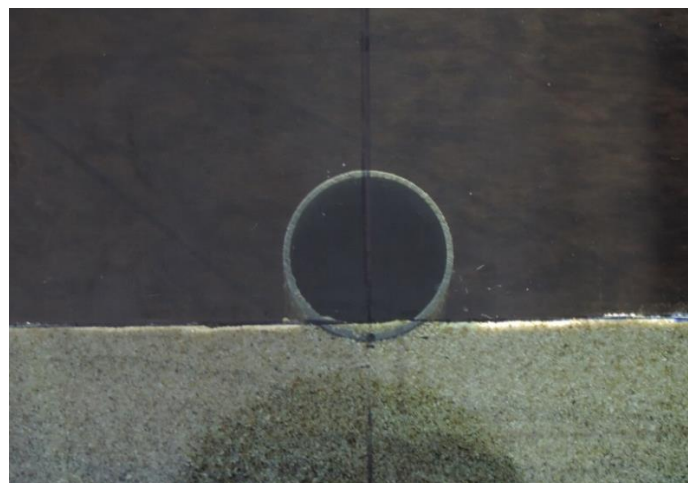
H (cm)	d (cm)	S (cm)	w (cm)
11	40	0.187	2.950
13	40	0.542	5.300
15	40	0.620	7.200

Kedalaman maksimum dan lebar *scouring* terbesar yaitu pada ketinggian gelombang 15 dengan nilai $S = 0.620$ cm dan $w = 7.200$ cm.



Gambar 4.9 Hasil *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D = -0.075$), tinggi gelombang (H) = 15 cm

4.3.4 Kondisi Pipa *In-Trench* ($e/D = -0.1$)



Gambar 4.10 Kondisi awal pipa *in-trench* ($e/D = -0.1$)

Gambar diatas merupakan kondisi awal sebelum gelombang dibangkitkan dimana pipa di pendam sedalam 0.4 cm. Berikut hasil eksperimen tiap ketinggian gelombang :

Tabel 4.8 Kedalaman dan lebar *scouring* kondisi $e/D = -0.1$

H (cm)	d (cm)	S (cm)	w (cm)
11	40	0.000	0.000
13	40	0.053	2.934
15	40	0.061	3.002

Kedalaman maksimum dan lebar scouring terbesar yaitu pada ketinggian gelombang 15 dengan nilai $S = 0.061$ cm dan $w = 3.002$ cm.



Gambar 4.11 Hasil *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D = -0.1$), tinggi gelombang (H) = 15 cm

4.4 Analisa Kedalaman dan Lebar *Scouring*

Hasil eksperimen yang telah ada dibandingkan dengan perhitungan empiris untuk mengetahui validitas pengujian. Untuk mendapatkan kedalaman dan lebar *scouring*, dilakukan perhitungan panjang gelombang terlebih dahulu yang kemudian mencari nilai kecepatan orbital gelombang pada masing-masing variasi. Kecepatan orbital gelombang mempengaruhi besarnya perpindahan sedimen di sekitar pipa.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Empiris Kedalaman dan Lebar Scouring

No	e/D	H (cm)	T (s)	d (cm)	Um (cm/s)	KC	S/D	S (cm)	w (cm)
1	0	11	1.0	50	8.812	2.203	0.156	0.625	4.679
2	0	13	1.0	50	10.414	2.604	0.170	0.680	5.215
3	0	15	1.0	50	12.017	3.004	0.183	0.730	5.724
4	0	11	1.0	40	12.835	3.209	0.189	0.755	5.974
5	0	13	1.0	40	15.169	3.792	0.205	0.821	6.659
6	0	15	1.0	40	17.502	4.376	0.221	0.882	7.308
7	-0.05	11	1.0	40	12.835	3.209	0.180	0.718	5.974
8	-0.05	13	1.0	40	15.169	3.792	0.195	0.781	6.659
9	-0.05	15	1.0	40	17.502	4.376	0.210	0.839	7.308
10	-0.075	11	1.0	40	12.835	3.209	0.175	0.700	5.974
11	-0.075	13	1.0	40	15.169	3.792	0.190	0.762	6.659
12	-0.075	15	1.0	40	17.502	4.376	0.205	0.819	7.308
13	-0.1	11	1.0	40	12.835	3.209	0.171	0.683	5.974
14	-0.1	13	1.0	40	15.169	3.792	0.186	0.743	6.659
15	-0.1	15	1.0	40	17.502	4.376	0.200	0.798	7.308

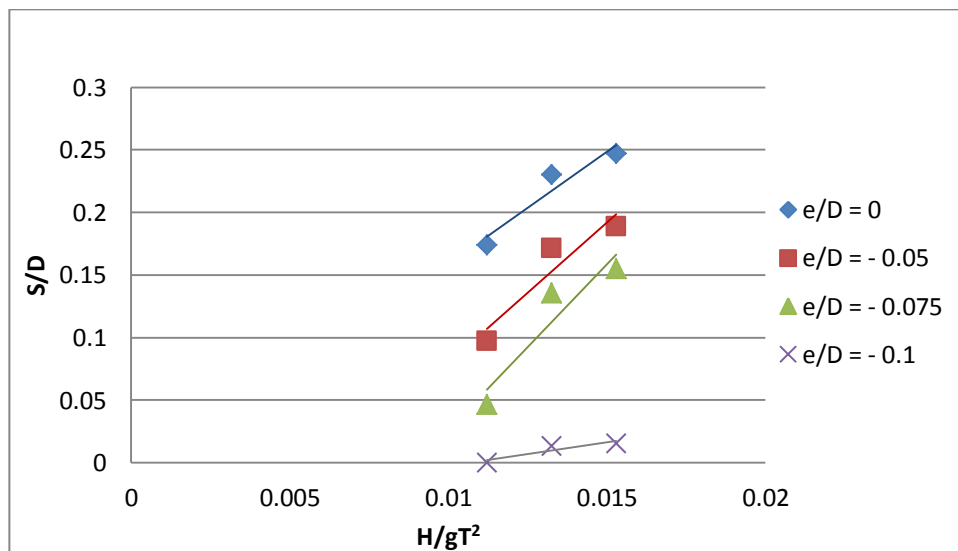
Tabel 4.10 Perbandingan Perhitungan Empiris dengan Eksperimen

No	e/D	H (cm)	d (cm)	T (s)	Perhitungan Empiris		Eksperimen	
					S (cm)	w (cm)	S (cm)	w (cm)
1	0	11	50	1.0	0.625	4.679	0.487	3.709
2	0	13	50	1.0	0.680	5.215	0.517	4.259
3	0	15	50	1.0	0.730	5.724	0.700	5.900
4	0	11	40	1.0	0.755	5.974	0.696	4.424
5	0	13	40	1.0	0.821	6.659	0.922	6.420
6	0	15	40	1.0	0.882	7.308	0.989	8.314
7	-0.05	11	40	1.0	0.718	5.974	0.390	4.150
8	-0.05	13	40	1.0	0.781	6.659	0.686	5.600
9	-0.05	15	40	1.0	0.839	7.308	0.756	7.300
10	-0.075	11	40	1.0	0.700	5.974	0.187	2.950
11	-0.075	13	40	1.0	0.762	6.659	0.542	5.300
12	-0.075	15	40	1.0	0.819	7.308	0.620	7.200
13	-0.1	11	40	1.0	0.683	5.974	0.000	0.000
14	-0.1	13	40	1.0	0.743	6.659	0.053	2.934
15	-0.1	15	40	1.0	0.798	7.308	0.061	3.002

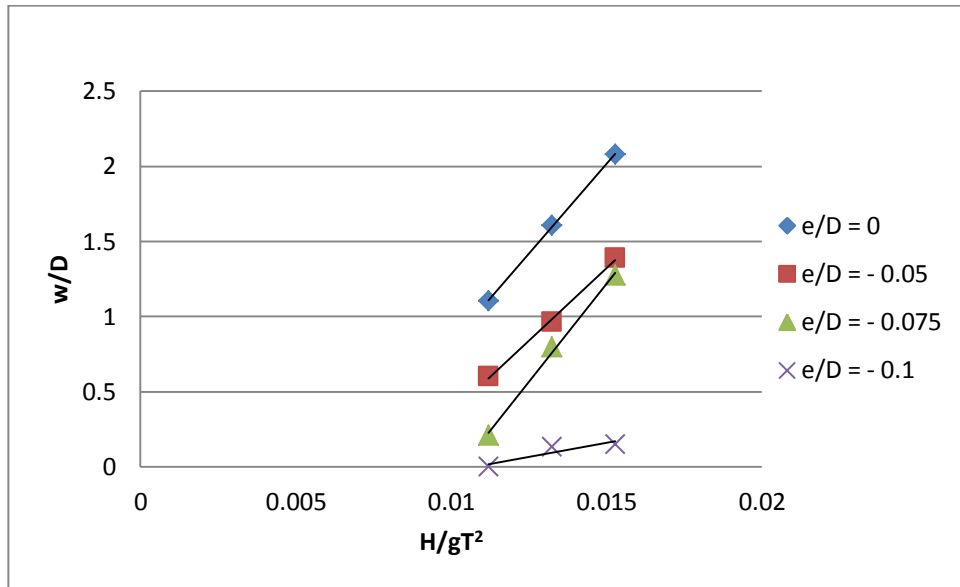
Pergerakan orbital gelombang semakin besar ketika jarak antara permukaan dengan dasar semakin dekat. Dengan demikian sedimen dapat berpindah tempat dan menyebabkan terbentuknya lubang *scouring*. Berdasarkan perbandingan perhitungan empiris dengan hasil eksperimen untuk kedalaman *scouring* terdapat eror sebesar 37.44% dan untuk lebar *scouring* yaitu 27.96 %. Hal tersebut terjadi karena pengaruh kondisi peletakkan pipa terhadap *seabed*. Semakin dalam kondisi pipa terpendam, semakin besar perbedaan hasil eksperimen dengan perhitungan empiris.

4.5 Analisa Parameter Tak Berdimensi

Untuk mempermudah menginterpretasikan data maka hasil perhitungan kedalaman maksimum dan lebar *scouring* yang telah di analisa dimensi. Parameter tak berdimensi yang digunakan yaitu ketinggian relatif (H/gT^2), kedalaman relatif (d/gT^2), KC (Keulegan-Carpenter number), Shield Parameter (Θ) terhadap bilangan non dimensional kedalaman *scouring* (S/D) dan lebar *scouring* (w/D). S merupakan kedalaman *scouring* dan D merupakan diameter pipa.

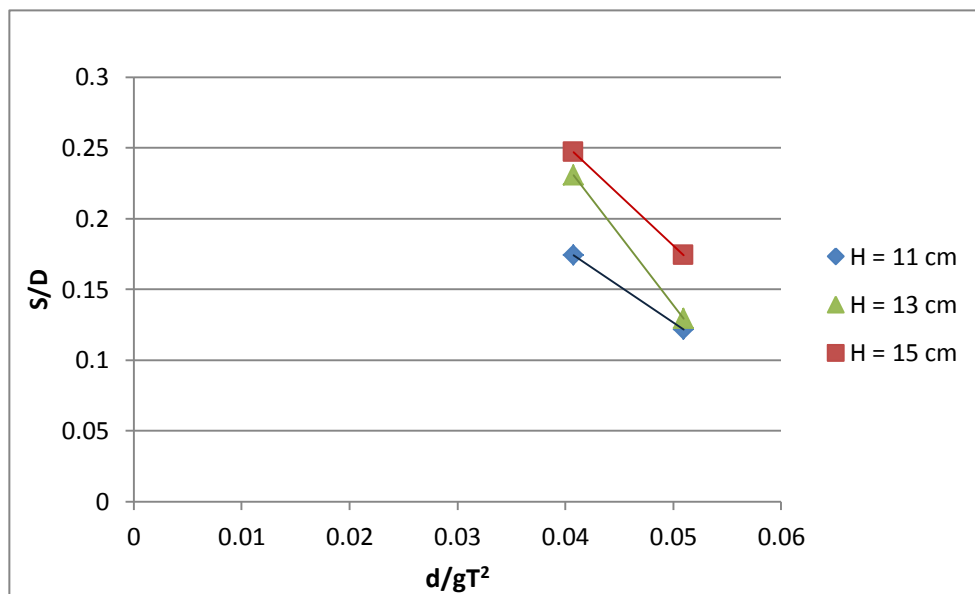


Gambar 4.12 Grafik hubungan ketinggian relatif gelombang (H/gT^2) dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D)

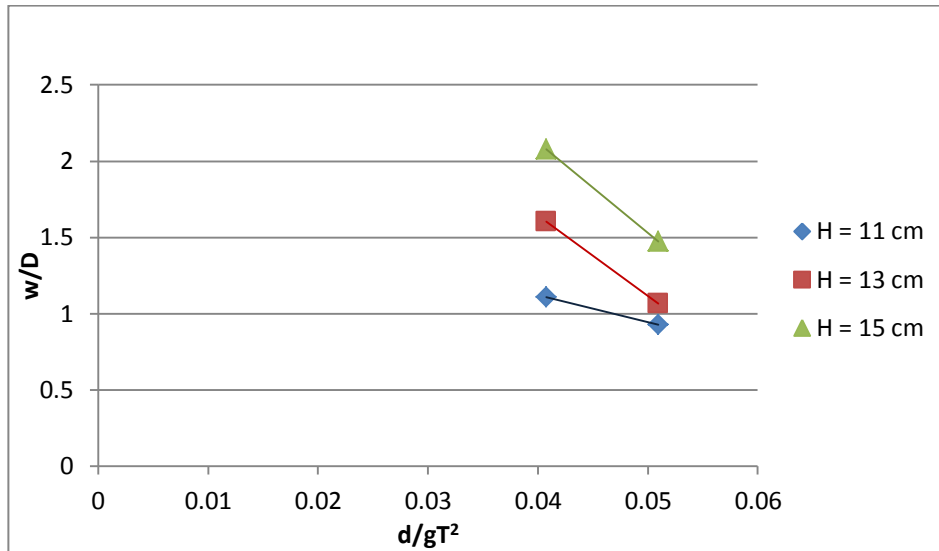


Gambar 4.13 Grafik hubungan ketinggian relative gelombang (H/gT^2) dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D)

Berdasarkan kedua grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi gelombang maka semakin besar nilai S/D dan w/D pada setiap kondisi pipa. Untuk perbedaan kedalaman dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

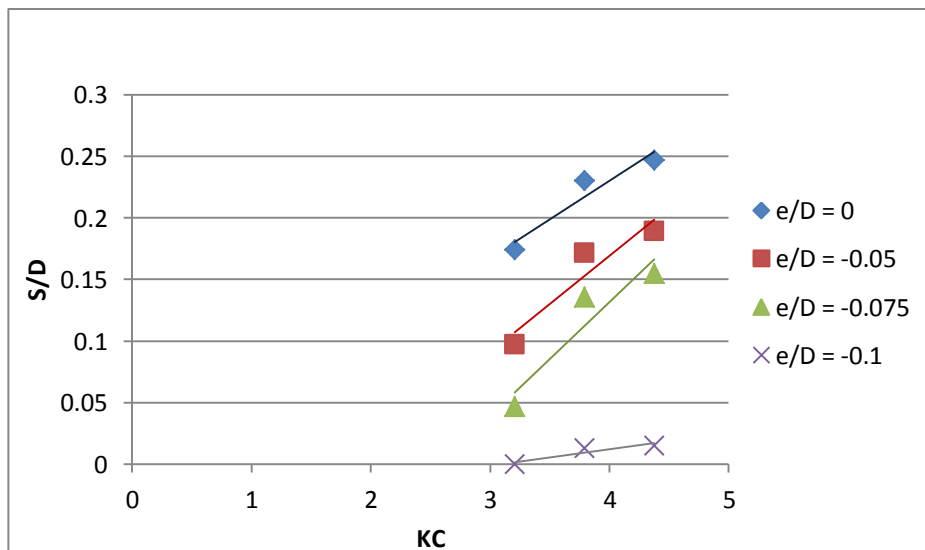


Gambar 4.14 Grafik hubungan kedalaman relatif gelombang (d/gT^2) dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D)

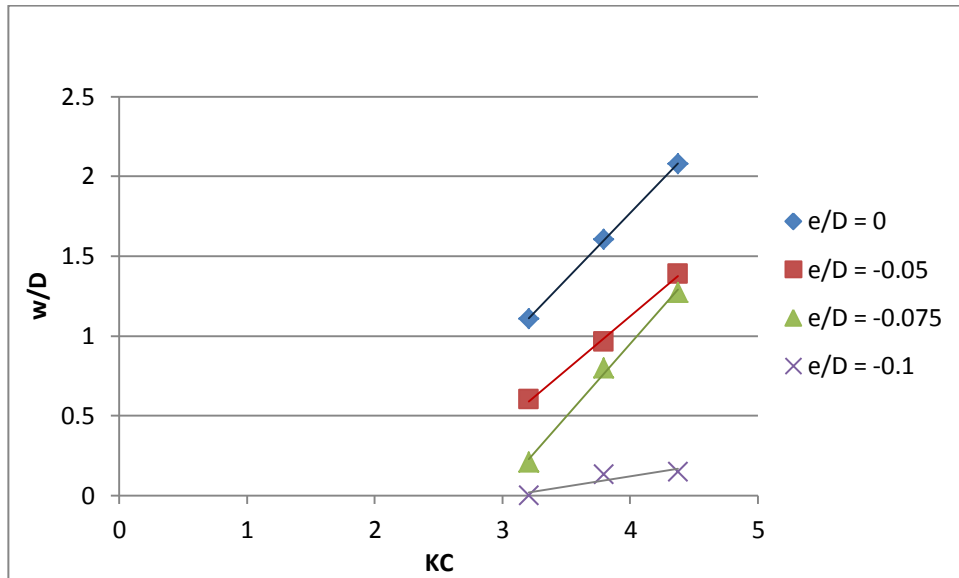


Gambar 4.15 Grafik hubungan kedalaman relatif gelombang (d/gT^2) dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D)

Semakin rendah kedalaman air, semakin tinggi nilai w/D dan S/D . Nilai kedalaman dan lebar *scouring* terbesar terjadi pada kondisi $H = 15$ cm, $d = 40$ cm, $e/D = 0$ (pipa kondisi meletak). Kondisi pipa meletak lebih menunjang terjadinya *scouring* karena tidak ada penahan aliran air. Pipa terpendam sebagian lebih baik karena merupakan salah satu cara untuk mengurangi tingkat resiko kegagalan struktur pipa.



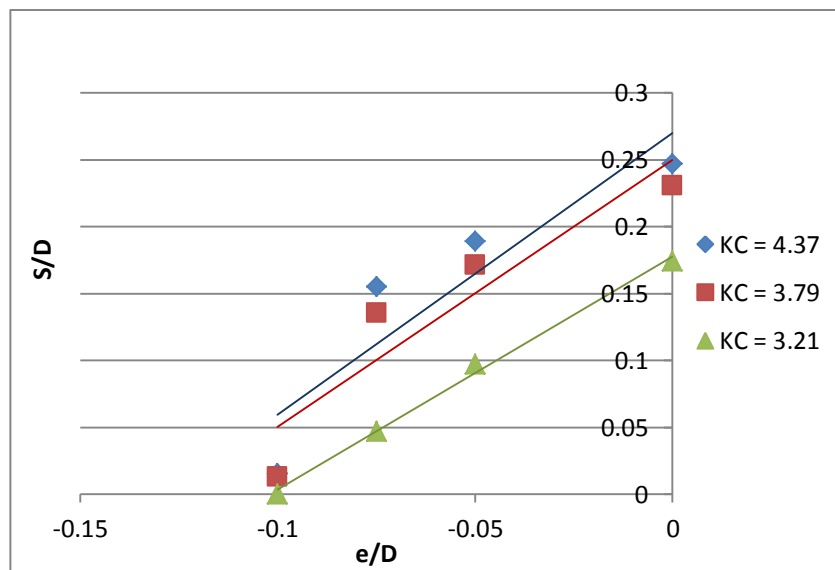
Gambar 4.16 Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D)



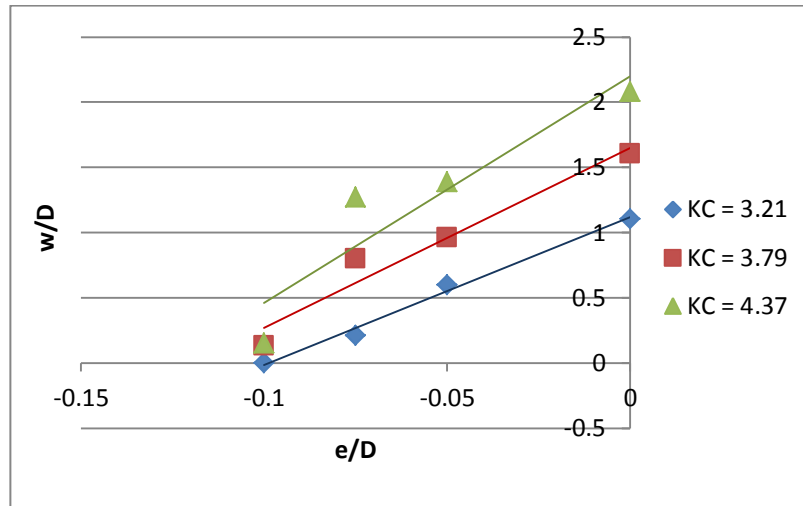
Gambar 4.17 Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D)

Berdasarkan grafik diatas diketahui bahwa semakin besar nilai KC maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring*. Nilai KC berbanding lurus dengan kecepatan orbital gelombang. Nilai KC yang besar menandakan kecepatan orbital gelombang semakin besar dan dapat terjadi penggerusan yang besar pula.

Parameter non dimensional selanjutnya yaitu hubungan *burial depth-diameter ratio* (e/D) terhadap S/D dan w/D .



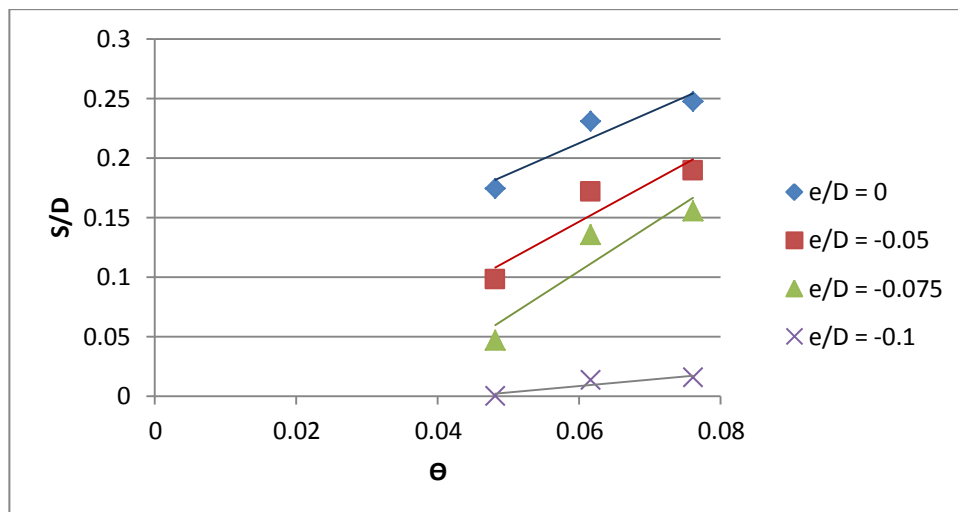
Gambar 4.18 Grafik hubungan *burial depth-diameter ratio* (e/D) dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D)



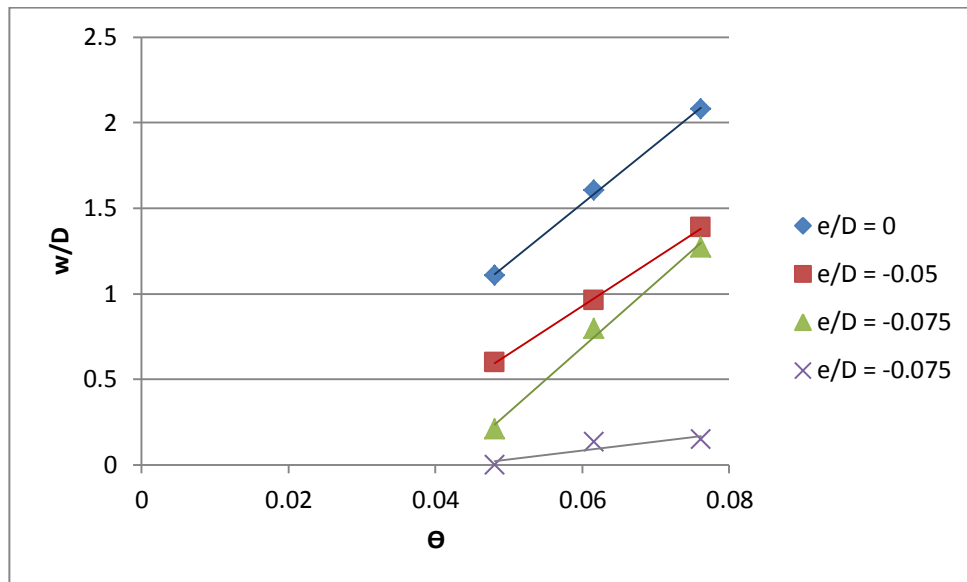
Gambar 4.19 Grafik hubungan antara *burial depth-diameter ratio* (e/D) dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D)

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa kedalaman dan lebar *scouring* terendah berada pada kondisi $e/D = -0.1$ dimana kondisi tersebut merupakan kedalaman maksimum variasi eksperimen. Semakin pipa terpendam berarti semakin kecil *scouring* yang terjadi.

Perbandingan selanjutnya yaitu pengaruh dari *shield parameter* (Θ) terhadap S/D dan w/D . *Shield parameter* adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menghitung inisiasi gerak sedimen dalam aliran fluida.



Gambar 4.20 Grafik hubungan *shield parameter* (Θ) dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D)

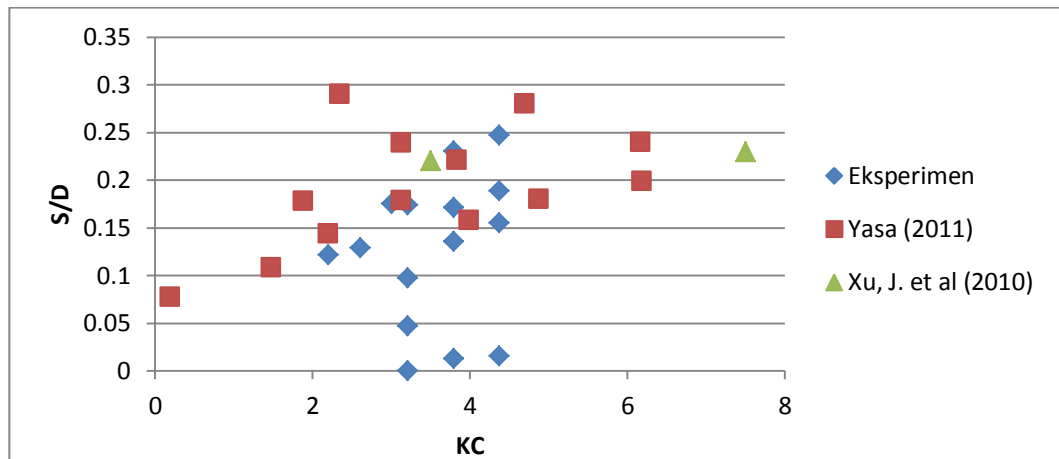


Gambar 4.21 Grafik hubungan *shield parameter* (Θ) dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D)

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan bahwa semakin besar *shield parameter* (Θ) maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring*. Hal yang mempengaruhi perhitungan *shield parameter* (Θ) yaitu ukuran d_{50} tanah dan kecepatan orbital gelombang. Jika *shield parameter* (Θ) bernilai tinggi menunjukkan kecepatan orbital gelombang juga tinggi dan dapat menyebabkan terbentuknya *scouring* yang besar.

4.6 Perbandingan dengan Penelitian Lain

Hasil eksperimen ini dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya untuk mengetahui seberapa besar kesesuaian maupun perbedaan dan mengetahui parameter apa yang mempengaruhi. Penelitian yang digunakan dalam pembandingan hasil eksperimen yaitu Yasa (2011) dan Xu, J. et al (2010) yang melakukan eksperimen dengan menggunakan gelombang. Xu, J (2010) melakukan eksperimen dengan tiga ukuran d_{50} . Namun, yang dibandingkan yaitu ukuran tanah d_{50} berdiameter 0.285 mm dengan nilai KC 3.5 dan 7.5. Perbedaan lainnya yaitu posisi pipa terhadap *seabed* dimana kedua penelitian sebelumnya tidak menggunakan *in-trench*.

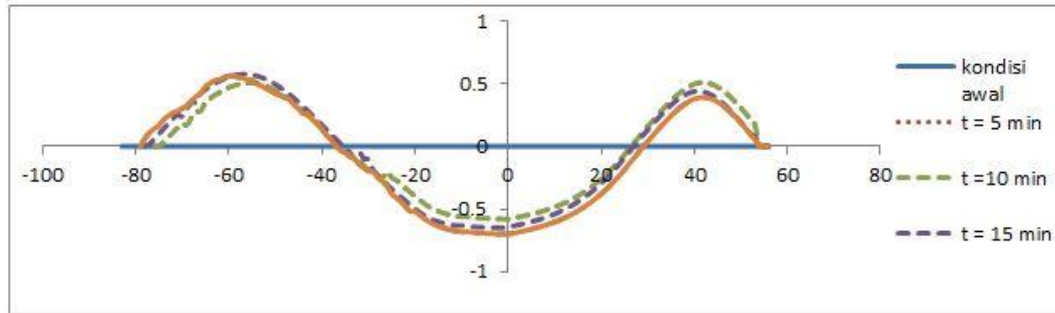


Gambar 4.22 Pengaruh KC terhadap S/D hasil eksperimen, penelitian Yasa (2011), dan Xu, J. et al (2010)

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa terjadinya kenaikan kedalaman *scouring* di semua variasi berdasarkan kenaikan nilai KC. Penelitian Yasa (2011) dan Xu, J. et al (2010) juga mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai KC. Namun pada eksperimen dengan kondisi *in-trench* $e/D = -0.1$ terdapat sedikit perbedaan dimana kedalaman *scouring* lebih kecil dibandingkan penelitian lainnya. Hal tersebut disebabkan perbedaan kondisi peletakkan pipa dimana Yasa (2011) terdapat gap antara *seabed* dengan pipa. Sedangkan pada penelitian Xu, J. et al (2010), kondisi pipa meletak di *seabed* ($e/D=0$).

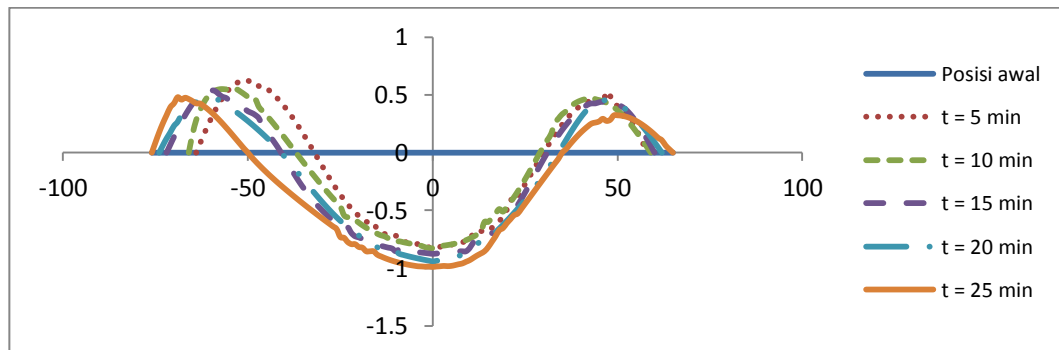
4.7 Laju Propagasi *Scouring* terhadap Waktu

Laju propagasi *scouring* merupakan proses terjadinya *scouring* dalam waktu tertentu. Laju propagasi akan ditampilkan untuk *scouring* terbesar untuk setiap kondisi peletakkan pipa terhadap *seabed*. Untuk variasi eksperimen seluruhnya dapat dilihat pada lampiran. Pencatatan data dilakukan dengan interval 5 menit selama 25 menit. Hasil gambar dibawah berasal dari plot foto yang diambil saat eksperimen berlangsung kedalam Auto CAD. Posisi pipa disesuaikan di titik tengah grafik.



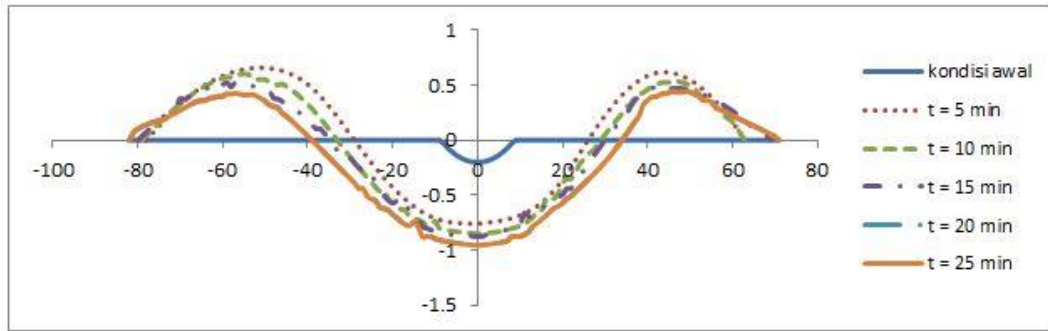
Gambar 4.23 Laju propagasi *scouring* kondisi pipa meletak ($e/D=0$), tinggi gelombang (H) = 15 cm, kedalaman air (d) = 50cm

Kedalaman *scouring* terbesar terjadi di 5 menit pertama dengan persentase untuk setiap kedalaman 50 cm dengan $H=11$ cm berjumlah 63.92%, $H=15$ cm berjumlah 70.10% dan $H=15$ cm berjumlah 82.86%.



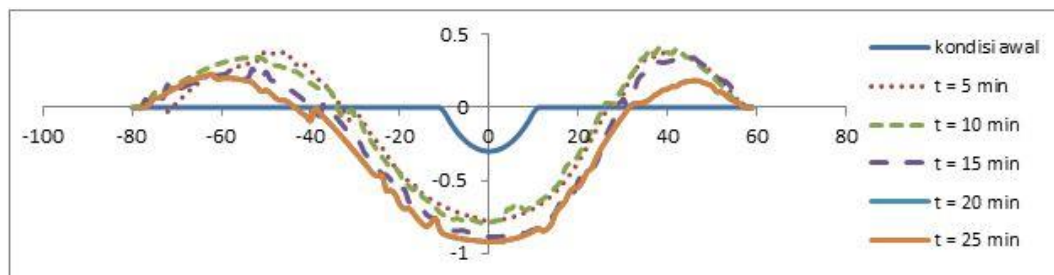
Gambar 4.24 Laju propagasi *scouring* kondisi pipa meletak ($e/D=0$), tinggi gelombang (H) = 15 cm, kedalaman air (d) = 40cm

Kedalaman *scouring* terbesar terjadi di 5 menit pertama dengan persentase untuk setiap kedalaman air 40 cm dengan $H=11$ cm berjumlah 78.49%, $H=13$ cm berjumlah 57.98%, dan $H=15$ cm berjumlah 82.33%. Terdapat perbedaan diantara gambar 4.23 dan 4.24 dimana kondisi pipa sama meletak, yaitu dengan kedalaman air berbeda sangat mempengaruhi kedalaman dan lebar *scouring*.



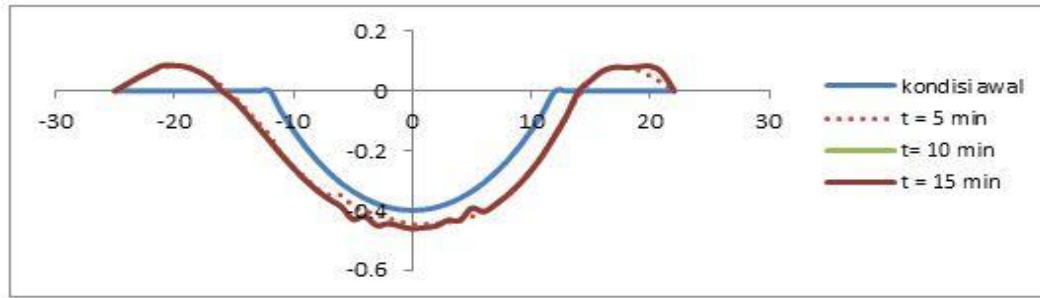
Gambar 4.25 Laju propagasi *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D=-0.05$), tinggi gelombang (H) = 15 cm, kedalaman air (d) = 40cm

Kondisi pipa dibenamkan sejauh 0.2 cm dari permukaan *seabed* yang dapat dilihat pada kondisi awal gambar 4.25. Kedalaman *scouring* untuk 5 menit pertama pada ketinggian gelombang 11 cm berjumlah 46.19%, untuk ketinggian gelombang 13 cm berjumlah 64.15%, dan ketinggian gelombang 15 cm berjumlah 74.07%. Untuk $H=11$ cm penggerusan terjadi perlahan dibandingkan dengan kedua variasi lainnya.



Gambar 4.26 Laju propagasi *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D=-0.075$), tinggi gelombang (H) = 15 cm, kedalaman air (d) = 40cm

Pipa dibenamkan sejauh 0.3 cm dari *seabed* seperti terlihat pada kondisi awal gambar 4.26. Kedalaman *scouring* dapat dipersentasekan untuk setiap ketinggian gelombang yaitu $H=11$ cm berjumlah 34.81%, $H=13$ cm berjumlah 82.16 %, dan $H=15$ cm berjumlah 87.26%.



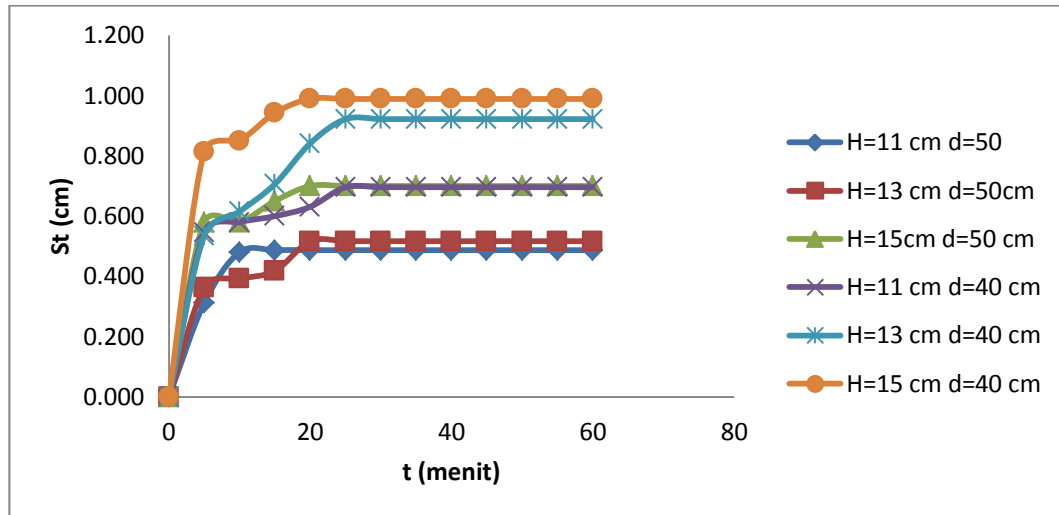
Gambar 4.27 Laju propagasi *scouring* kondisi pipa *in-trench* ($e/D=-0.075$), tinggi gelombang (H) = 15 cm, kedalaman air (d) = 40cm

Pipa dibenamkan sejauh 0.4 cm dari *seabed* seperti terlihat pada kondisi awal gambar 4.27. Kedalaman *scouring* dipersentasekan untuk setiap ketinggian gelombang yaitu $H=11$ cm berjumlah 0%, $H=13$ cm berjumlah 78.18 %, dan $H=15$ cm berjumlah 44.75%. Pada kondisi ini membutuhkan waktu maksimal 15 menit untuk mencapai kondisi *scouring* maksimum kecuali pada ketinggian gelombang 11 cm.

Untuk menyimpulkan hasil laju propagasi dari seluruh variasi eksperimen, ditampilkan pada tabel dibawah ini untuk kedalaman *scouring* kumulatif di setiap pengambilan data yaitu setiap 5 menit. St merupakan kedalaman *scouring* kumulatif pada tiap waktu.

Tabel 4.11 Kedalaman *scouring* berdasarkan tiap waktu kondisi pipa meletak ($e/D=0$)

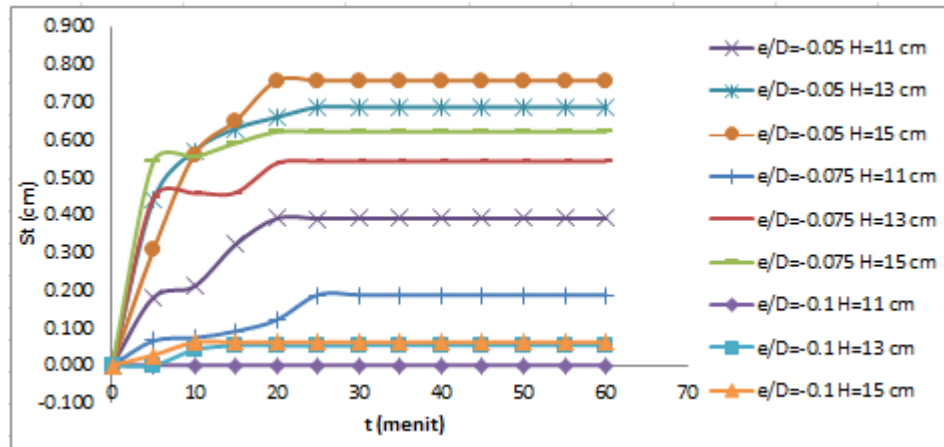
No	e/D	H (cm)	d (cm)	St ($t=0$ min)	St ($t=5$ min)	St ($t=10$ min)	St ($t=15$ min)	St ($t=20$ min)	St ($t=25$ min)
1	0	11	50	0.000	0.312	0.480	0.487	0.487	0.487
2	0	13	50	0.000	0.363	0.392	0.418	0.517	0.517
3	0	15	50	0.000	0.580	0.580	0.650	0.700	0.700
4	0	11	40	0.000	0.546	0.580	0.600	0.631	0.696
5	0	13	40	0.000	0.535	0.615	0.706	0.841	0.922
6	0	15	40	0.000	0.814	0.850	0.942	0.989	0.989



Gambar 4.28 Grafik proses terjadinya *scouring* hingga mencapai kesetimbangan pada kondisi pipa meletak ($e/D=0$)

Tabel 4.12 Kedalaman *scouring* berdasarkan tiap waktu kondisi pipa *in-trench* ($e/D=-0.05$, $e/D=-0.075$, $e/D=-0.1$)

No	e/D	H (cm)	d (cm)	St (t=0 min)	St (t=5 min)	St (t=10 min)	St (t=15 min)	St (t=20 min)	St (t=25 min)
1	-0.05	11	40	0.000	0.180	0.210	0.321	0.390	0.390
2	-0.05	13	40	0.000	0.440	0.570	0.629	0.659	0.686
3	-0.05	15	40	0.000	0.306	0.560	0.650	0.756	0.756
4	-0.075	11	40	0.000	0.065	0.073	0.091	0.121	0.187
5	-0.075	13	40	0.000	0.445	0.457	0.459	0.536	0.542
6	-0.075	15	40	0.000	0.541	0.554	0.590	0.620	0.620
7	-0.1	11	40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	-0.1	13	40	0.000	0.00	0.041	0.053	0.053	0.053
9	-0.1	15	0.4	0.000	0.027	0.061	0.061	0.061	0.061



Gambar 4.29 Grafik proses terjadinya *scouring* hingga mencapai kesetimbangan pada kondisi pipa *in-trench* ($e/D=-0.05$, $e/D=-0.075$, $e/D=-0.1$)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari eksperimen mengenai *scouring* pada sekitar pipa akibat gelombang reguler dapat disimpulkan :

1. Kedalaman dan lebar *scouring* yang terbesar yaitu pada kondisi pipa meletak ($e/D = 0$), tinggi gelombang 15 cm, dan kedalaman air 40 cm. Kedalaman *scouring* mencapai 0.99 cm dan lebar *scouring* 8.31 cm.
2.
 - a. Pengaruh posisi pipa (e/D) terhadap karakteristik *scouring* yaitu semakin dalam pipa dibenamkan, maka semakin kecil kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi.
 - b. Pengaruh ketinggian relatif (H/gT^2) terhadap karakteristik *scouring* yaitu semakin tinggi gelombang, maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi.
 - c. Pengaruh kedalaman relatif air (d/gT^2) terhadap karakteristik *scouring* yaitu semakin rendah kedalaman air, maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi. Hal tersebut disebabkan karena kecepatan orbital gelombang akan meningkat seiring menurunnya kedalaman air.
 - d. Pengaruh *shield parameter* (Θ) terhadap karakteristik *scouring* yaitu semakin besar Θ maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring* terjadi.
3. Laju propagasi *scouring* konstan pada $t = 25$ menit. Sedangkan terjadinya *scouring* yang signifikan yaitu pada 5 menit pertama dengan rata-rata penggerusan terjadi sebesar 65.26%. Untuk kondisi pipa *in-trench* ($e/D = -0.1$) dan $H = 11$ cm tidak terjadi *scouring*.

5.2 Saran

Dari eksperimen yang dilakukan, saran penulis untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Melakukan penelitian dengan variasi periode gelombang, diameter pipa, dan ukuran butiran pasir

2. Melakukan penelitian dengan kondisi arus maupun kombinasi gelombang dan arus karena arus berdampak lebih tinggi terhadap terjadinya *scouring*.
3. Melakukan penelitian *scouring* dengan menggunakan software

DAFTAR PUSTAKA

- Bijker, E.W. 1986. Scour Around Structure. *Proceedings of 20th Conference on Coastal Engineering*. ASCE Publisher.
- Bijker, E. W., Leeuwestein, W. 1984. *Interaction Beetwen Pipelines and the Seabed Under the Influence of Waves and Currents*. Seabed Mechanics section 7 p. 235-242.
- Budiarti, L. 2016. *Pemodelan Numerik Profil 2D Scouring Pada Pipa Bawah Laut Dengan Variasi Jarak Clearance Terhadap Dasar Laut*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS. Surabaya.
- CERC, 1984. *Shore Protection Manual Volume I*. US Army Coastal Engineering Research Center. Washington DC.
- Cheng, L., Yeow, K., Zang, Z., Li, F. 2014. "3D Scour Below Pipelines Under Waves And Combined Waves And Currents." *Coastal Engineering*. (83) : 137-149.
- Coastal Engineering Manual (CEM). 2006. EM 1110-2-1100, Washington, DC.
- Etemad-Shahidi, A., Yasa, R., Kazeminezhad, M. H. 2011. "Prediction of Wave –Induced Scour Depth under Submarine Pipelines Using Machine Learning Approach." *Applied Ocean Researc*. 33(1), 54-59.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., Ghalambor, A. 2005. *Offshore Pipelines*. Elsevier Publisher p304.
- Husrin, S. 2015. *Teori Pemodelan Fisik dan Contoh Penerapan di Bidang Teknik Pantai*. Kementrian Pekerjaan Umum, Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air Satuan Kerja Balai Pantai. Bandung.
- Kjeldsen, S. P., Gjorsvik, O., Bringager, K. G., Jacobsen, J. 1973. "Local Scour Near Offshore Pipelines." *Second International Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Conf. Reykjavik, 308-331.

- Leeuwenstein, W., Bijker, E. A., Peerbolte, E.B. and Wind, H. G. 1985. The Natural Self-Burial Of Submarine Pipelines. *Proceedings of the 4th International Conference on Behavior Of Offshore Structures (BOSS)*, Elsevier Science Publishers, vol. 2, 717-728.
- Nugraha, M.C. 2012. *Analisis Pengaruh Scouring pada Pipa Bawah Laut (Studi Kasus Pipa Gas Transmisi SSJW Jalur Pipa Gas Labuhan Maringai-Muara Bekasi*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS. Surabaya.
- Nugroho, A. 2011. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kodeco Jalur Poleng-Gresik Dengan Variasi Tipe Tanah*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS. Surabaya.
- Pebriantina, M. 2016. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kondisi In-Trench dan Pengembangan Perangkat Lunak untuk Pemodelan Matematis dengan Variasi Diameter Pipa*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS. Surabaya.
- Soulsby, R. L. 1997. Dynamics of marine sands. A manual for Practical applications. Thomas Telford Publication: London.
- Sumer, B.M., dan Fredsøe, J. 2002. *The Mechanics of Scour In The Marine Environment*. World Scientific : Denmark.
- Whitehouse, R. 1998. *Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford Publications : London.
- Xu, J., Li, G., Dong, P., Shi, J. 2010. "Bedform Evolution Around A Submarine Pipeline And Its Effects On Wave-Induced Forces Under Regular Waves." *Ocean Engineering*, (37): 304-313.
- Yasa, R. 2011. "Prediction of Scour Depth Under Submarine Pipelines-in Wave Condition." *Journal of Coastal Research*, SI 64, 627-630, Szczecin, Poland.
- Mao, Y. 1986. *The Interaction Between A Pipeline And An Erodible Bed*. Series Paper 39, Tech. Univ. of Denmark, ISVA, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Ph.D.

- Zhao, Z.H., and Fernando, H.J.S. 2007. *Numerical Simulation of Scour Around Pipelines Using An Euler-Euler Coupled Two-Phase Model*. Environmental Fluid Mechanics 7. 121-142.
- Zhou, C., Li, G., Dong, P., Shi, J., Xu, J. 2010. "An Experimental Study of Seabed Responses Around A Marine Pipeline Under Wave And Current Conditions." *Ocean Engineering*. (38) : 226-234.

LAMPIRAN A

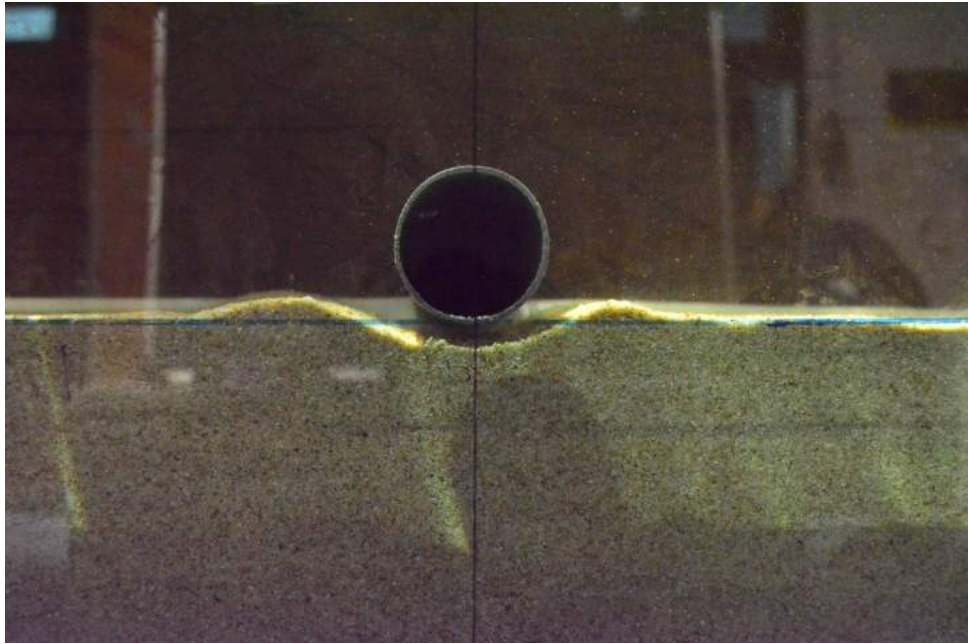
Hasil Foto *Scouring* pada Kondisi Maksimum



Gambar 1. Kedalaman maksimum $d=50$ cm, $H=11$ cm, $e/D=0$



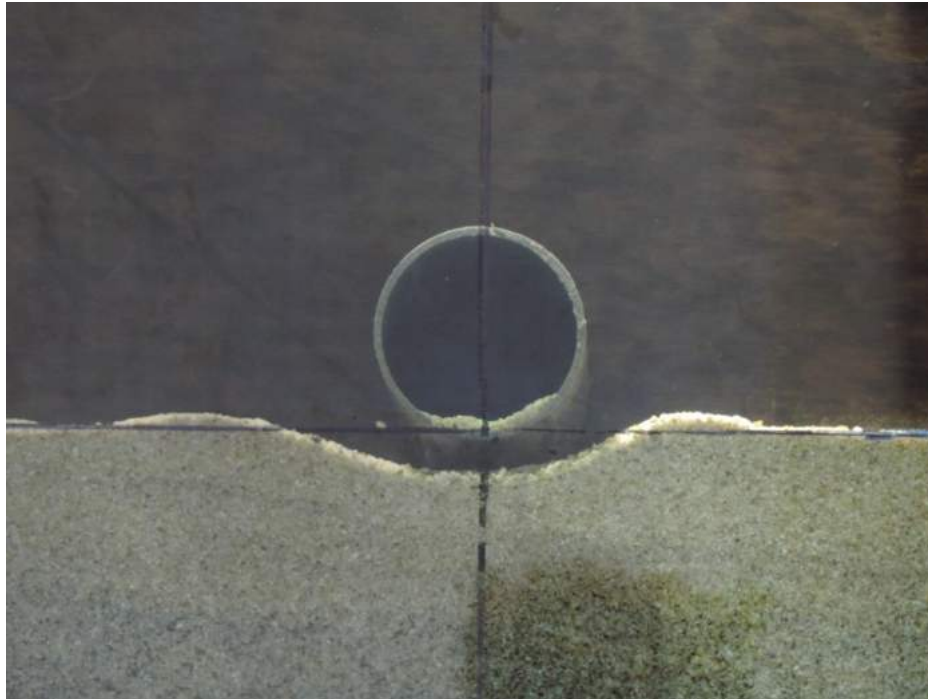
Gambar 2. Kedalaman maksimum $d=50$ cm, $H=13$ cm, $e/D=0$



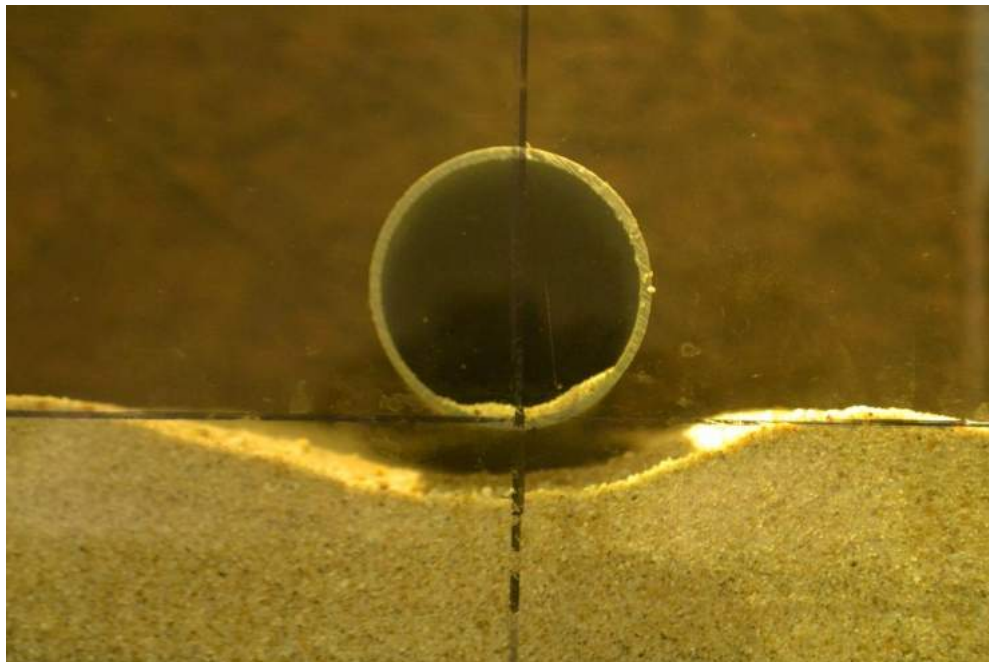
Gambar 3. Kedalaman maksimum $d=50$ cm, $H=15$ cm, $e/D=0$



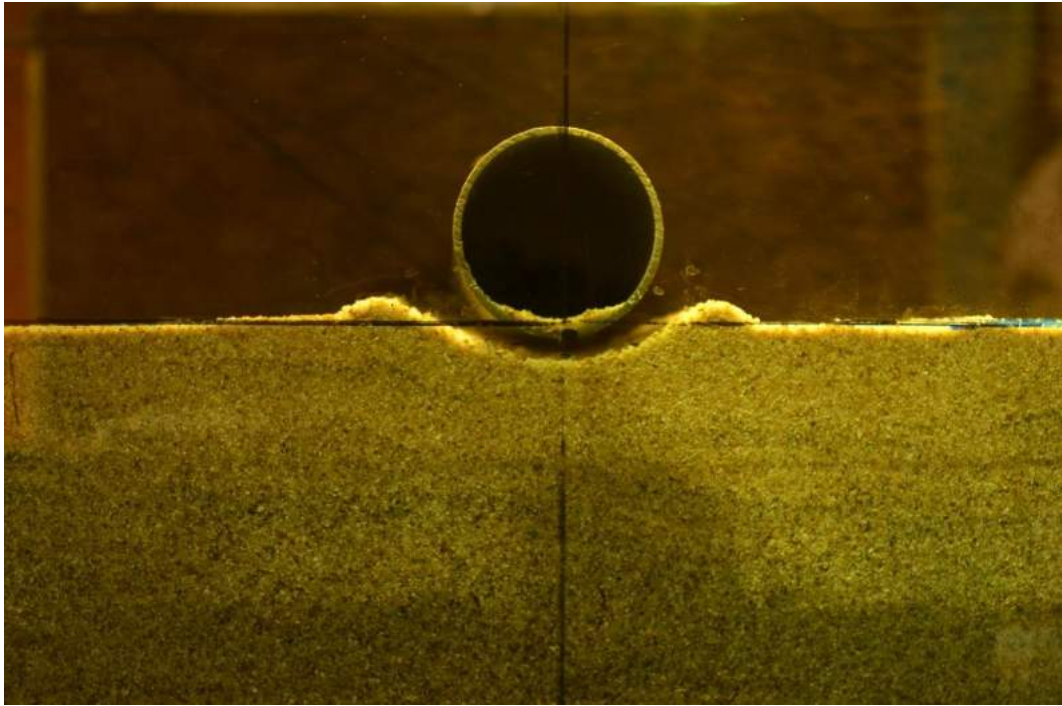
Gambar 4. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=11$ cm, $e/D=0$



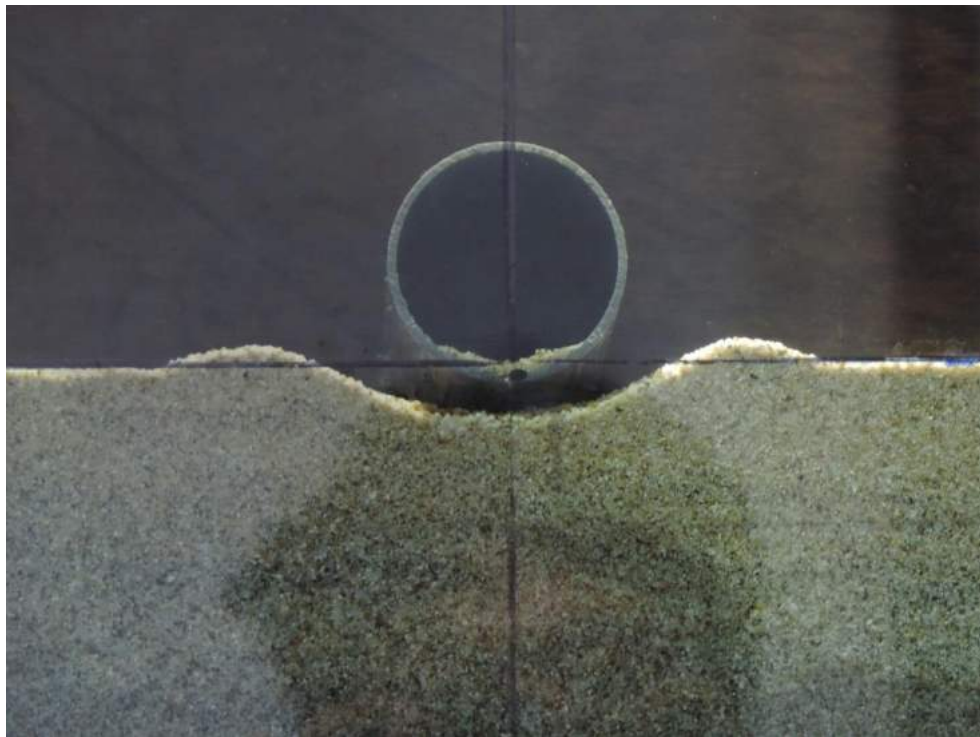
Gambar 5. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=13$ cm, $e/D=0$



Gambar 6. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=15$ cm, $e/D=0$



Gambar 7. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=11$ cm, $e/D=-0.05$



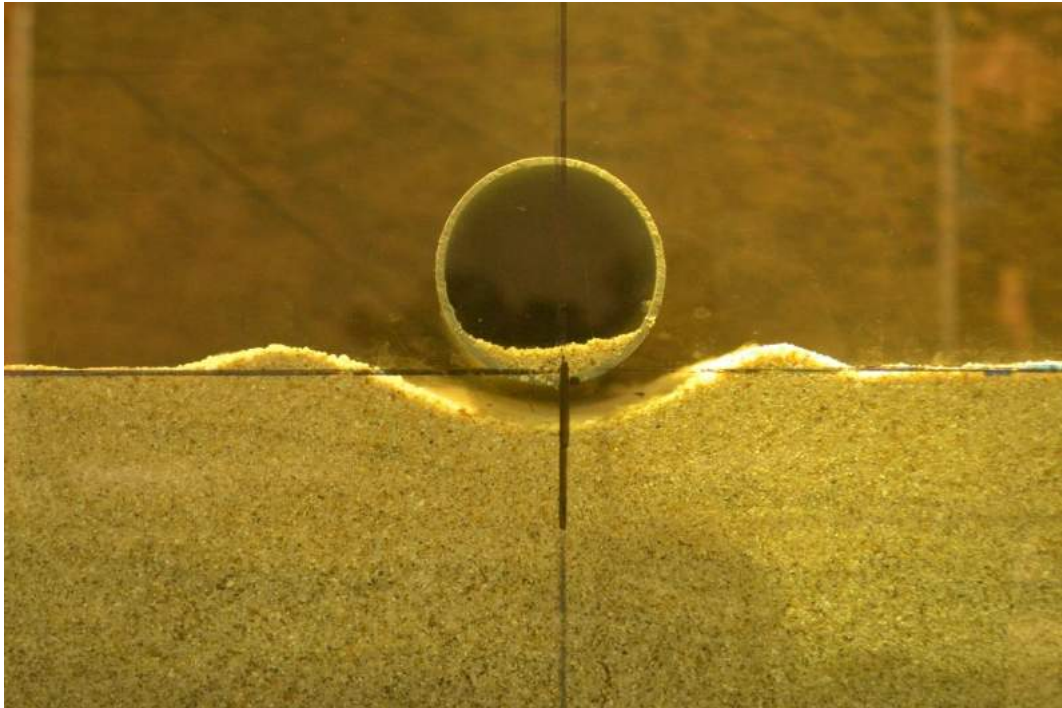
Gambar 8. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=13$ cm, $e/D=-0.05$



Gambar 9. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=15$ cm, $e/D=-0.05$



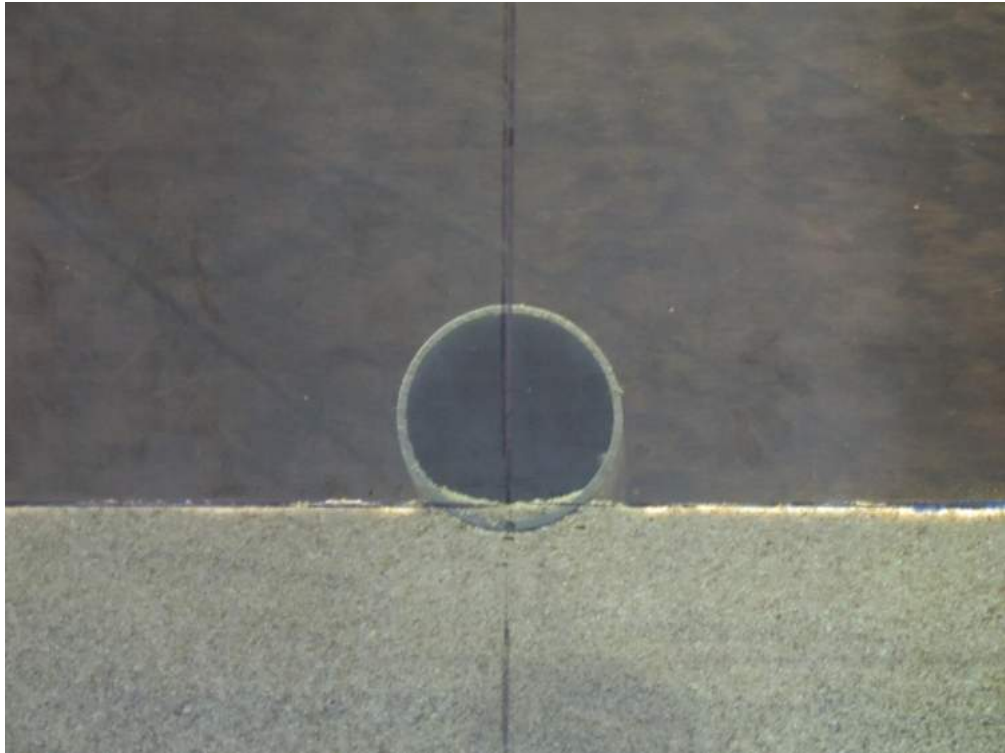
Gambar 10. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=11$ cm, $e/D=-0.075$



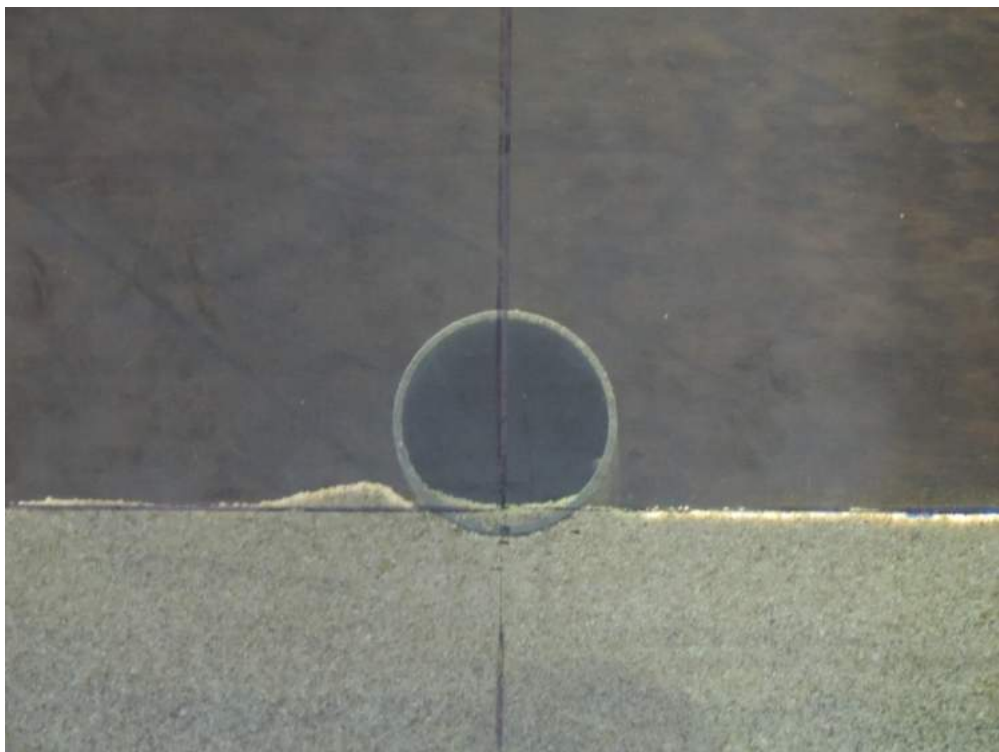
Gambar 11. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=13$ cm, $e/D=-0.075$



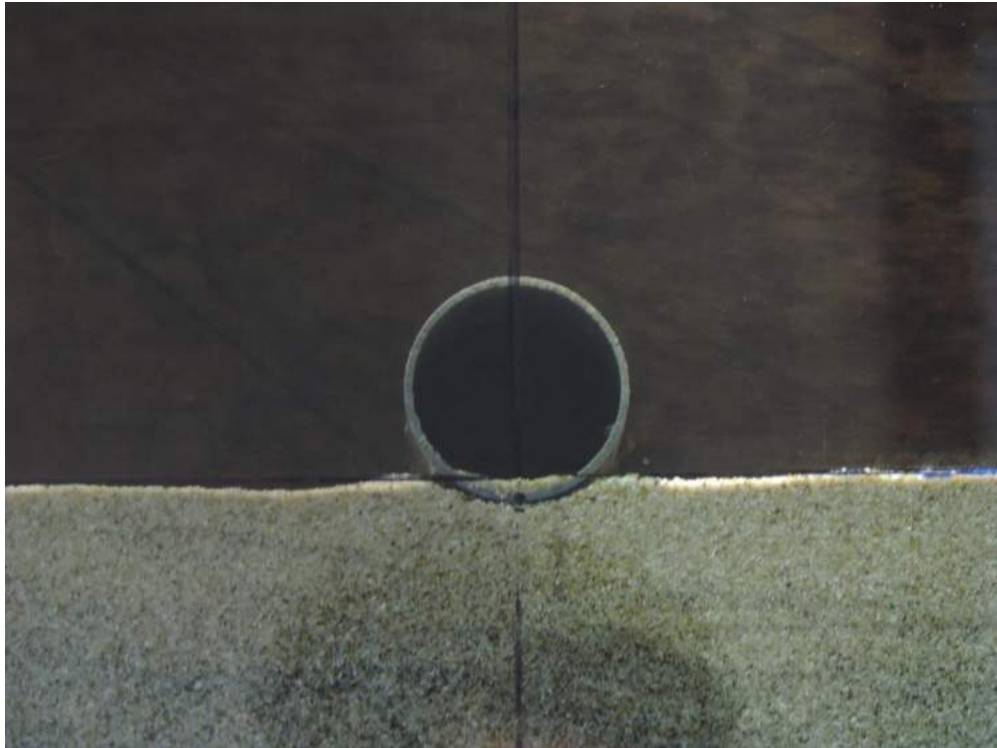
Gambar 12. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=15$ cm, $e/D=-0.075$



Gambar 13. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=11$ cm, $e/D=-0.1$



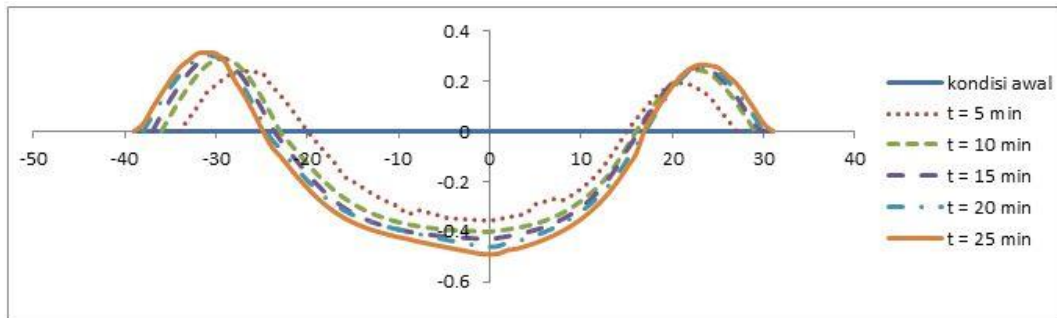
Gambar 14. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=13$ cm, $e/D=-0.1$



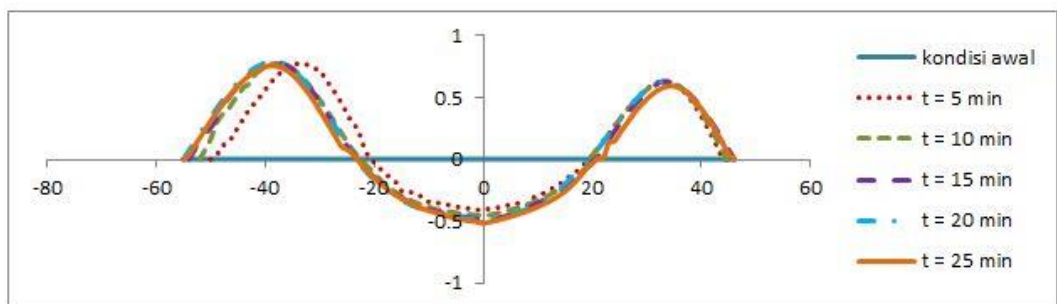
Gambar 15. Kedalaman maksimum $d=40$ cm, $H=15$ cm, $e/D=-0.1$

LAMPIRAN B

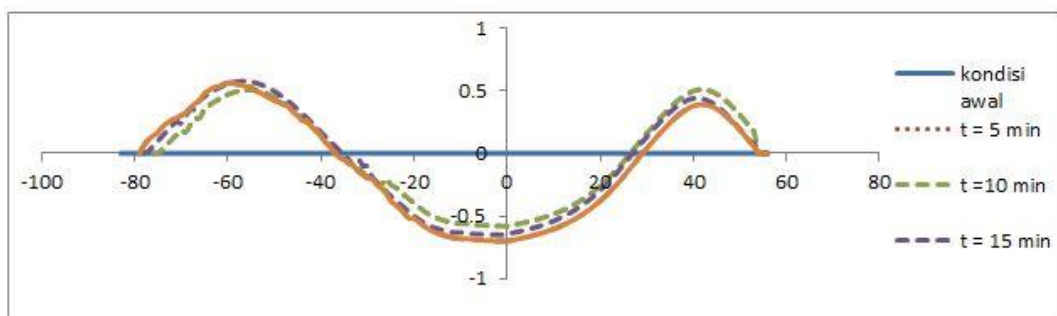
LAJU PROPAGASI *SCOURING*



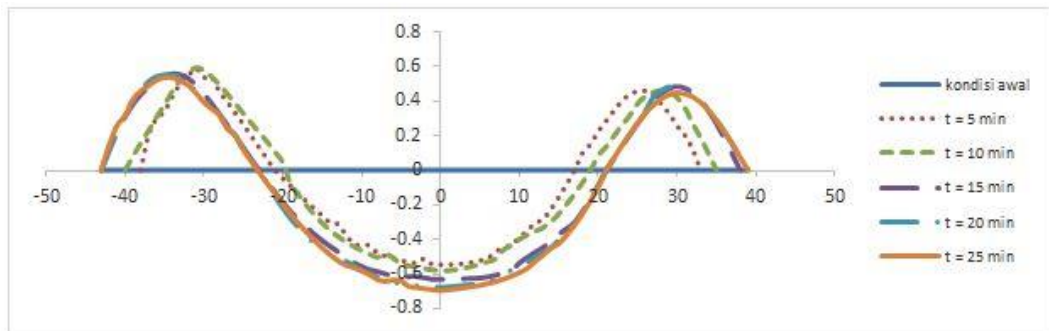
Gambar 1. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=11$ cm, $d=50$ cm



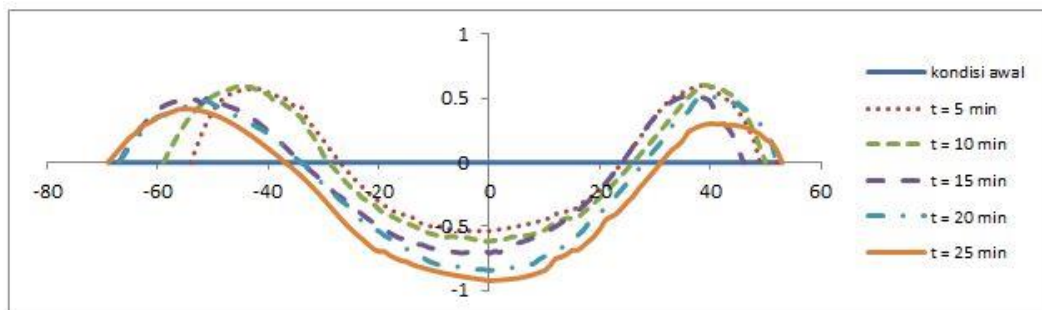
Gambar 2. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=13$ cm, $d=50$ cm



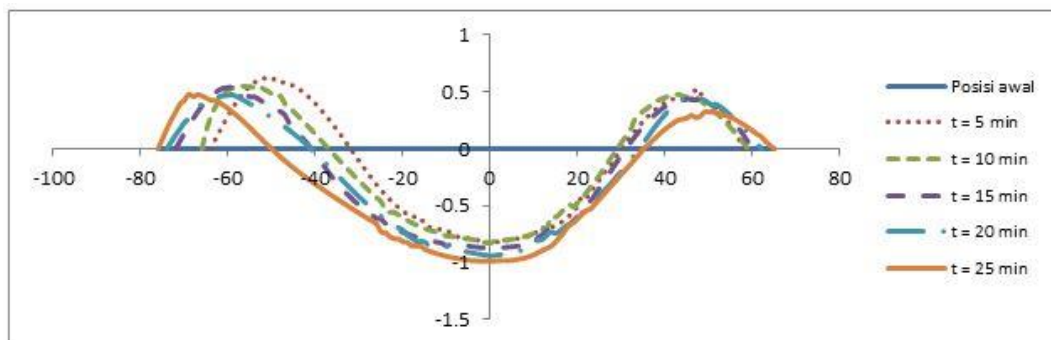
Gambar 3. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=15$ cm, $d=50$ cm



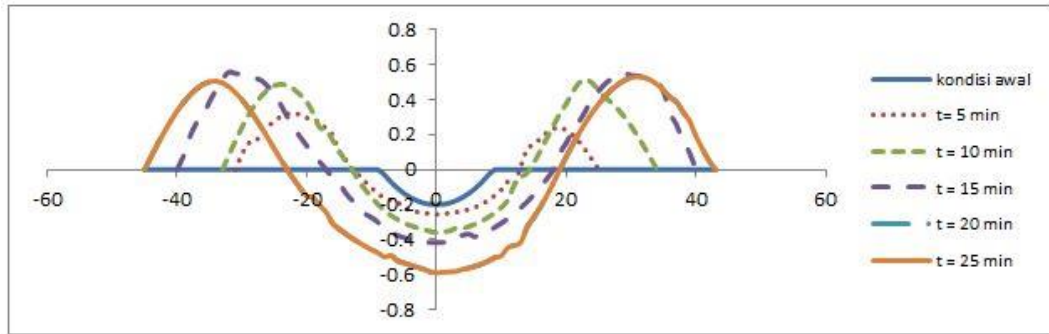
Gambar 4. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=11$ cm, $d=40$ cm



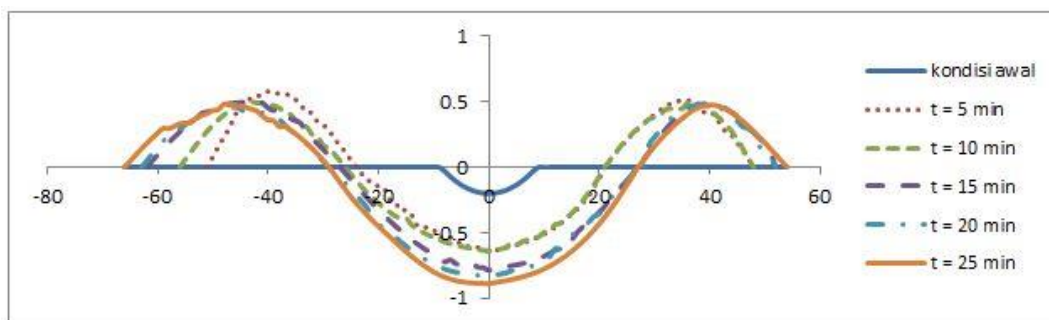
Gambar 5. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=13$ cm, $d=40$ cm



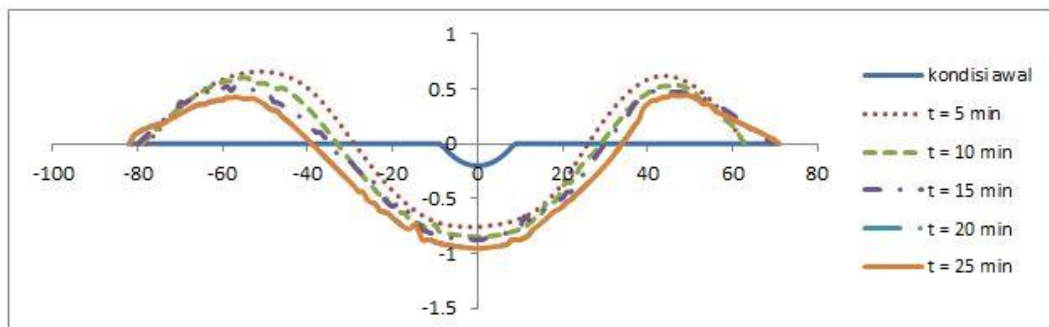
Gambar 6. Laju propagasi kondisi $e/D=0$, $H=15$ cm, $d=40$ cm



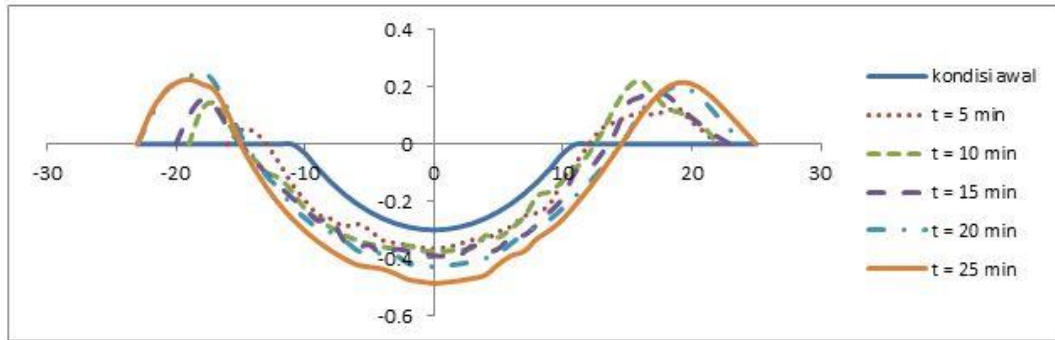
Gambar 7. Laju propagasi kondisi $e/D = -0.05$, $H = 11$ cm, $d = 40$ cm



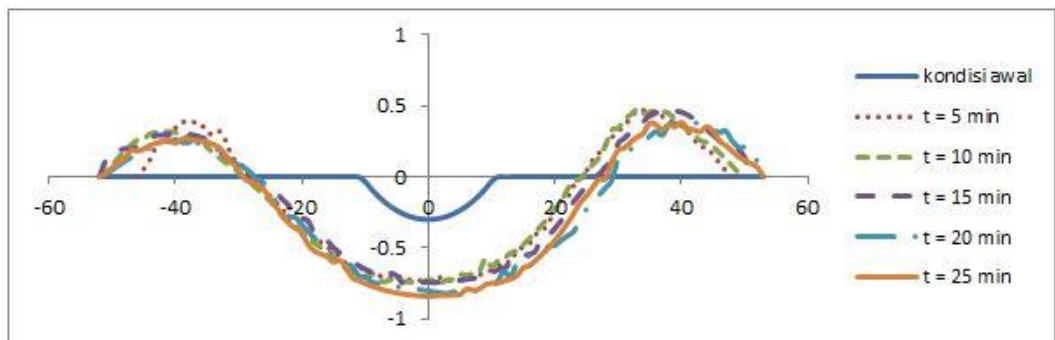
Gambar 8. Laju propagasi kondisi $e/D = -0.05$, $H = 13$ cm, $d = 40$ cm



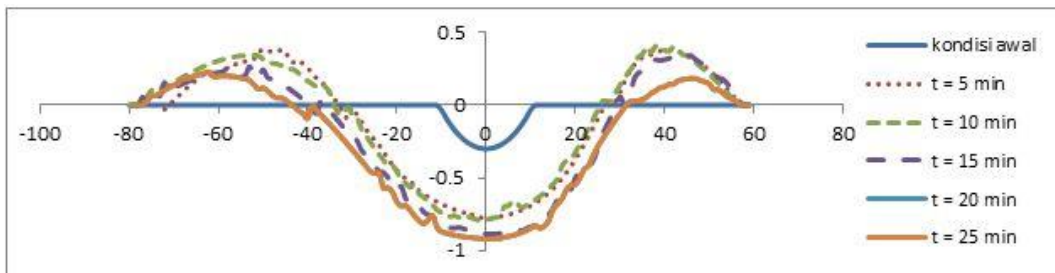
Gambar 9. Laju propagasi kondisi $e/D = -0.05$, $H = 15$ cm, $d = 40$ cm



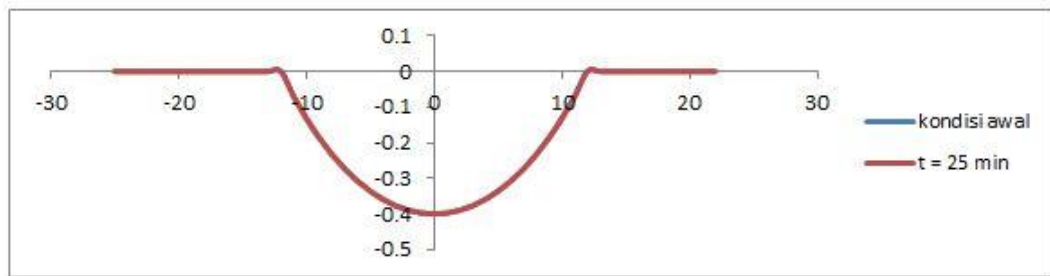
Gambar 10. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.075$, $H=11$ cm, $d=40$ cm



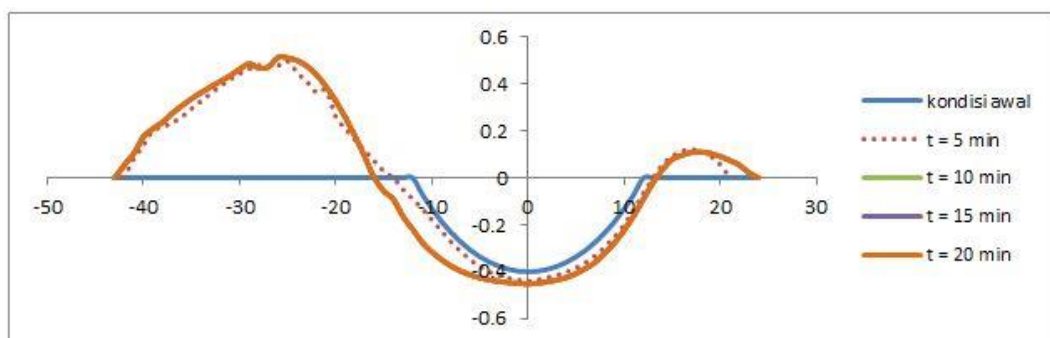
Gambar 11. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.075$, $H=13$ cm, $d=40$ cm



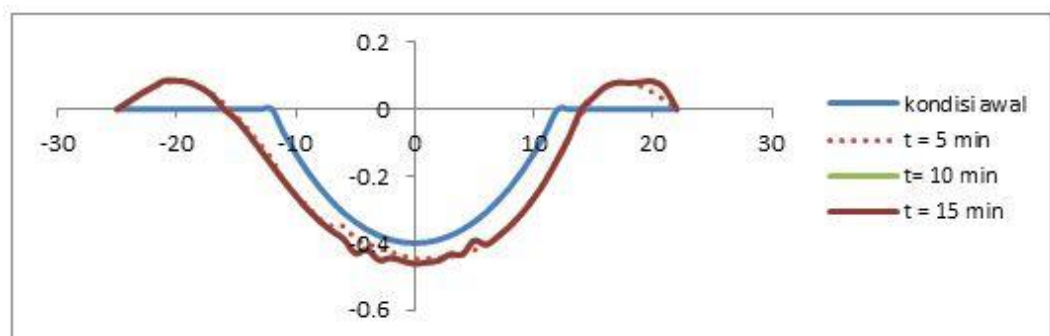
Gambar 12. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.075$, $H=15$ cm, $d=40$ cm



Gambar 13. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.1$, $H=11$ cm, $d=40$ cm



Gambar 14. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.1$, $H=13$ cm, $d=40$ cm



Gambar 15. Laju propagasi kondisi $e/D=-0.1$, $H=15$ cm, $d=40$ cm

LAMPIRAN C

Perhitungan Parameter Tak Berdimensi

Tabel 1. Perbandingan Ketinggian Relatif Gelombang

No.	e/D	H	H/gt ²	S/D	w/D
1	0	0.11	0.011	0.174	1.106
2	0	0.13	0.013	0.230	1.605
3	0	0.15	0.015	0.247	2.079
4	-0.05	0.11	0.011	0.097	1.038
5	-0.05	0.13	0.013	0.172	1.400
6	-0.05	0.15	0.015	0.189	1.825
7	-0.075	0.11	0.011	0.047	0.738
8	-0.075	0.13	0.013	0.136	1.325
9	-0.075	0.15	0.015	0.155	1.800
10	-0.1	0.11	0.011	0.000	0.000
11	-0.1	0.13	0.013	0.013	0.733
12	-0.1	0.15	0.015	0.015	0.751

Tabel 2. Perbandingan *Keulegan-Carpenter number*

No	e/D	H (cm)	d (cm)	KC	S/D	w/D
1	0	11	40	3.21	0.174	1.106
2	0	13	40	3.79	0.231	1.605
3	0	15	40	4.37	0.247	2.079
4	-0.05	11	40	3.21	0.097	1.038
5	-0.05	13	40	3.79	0.172	1.400
6	-0.05	15	40	4.37	0.189	1.825
7	-0.075	11	40	3.21	0.047	0.738
8	-0.075	13	40	3.79	0.136	1.325
9	-0.075	15	40	4.37	0.155	1.800
10	-0.1	11	40	3.21	0.000	0.000
11	-0.1	13	40	3.79	0.013	0.733
12	-0.1	15	40	4.37	0.015	0.751

Tabel 3. Perbandingan *burial depth-diameter* (e/D)

No	e/D	H (cm)	d (cm)	S/D	w/D
1	0	11	40	0.174	1.106
2	0	13	40	0.231	1.605
3	0	15	40	0.247	2.079
4	-0.05	11	40	0.097	1.038
5	-0.05	13	40	0.172	1.400
6	-0.05	15	40	0.189	1.825
7	-0.075	11	40	0.047	0.738
8	-0.075	13	40	0.136	1.325
9	-0.075	15	40	0.155	1.800
10	-0.1	11	40	0.000	0.000
11	-0.1	13	40	0.013	0.733
12	-0.1	15	40	0.015	0.751

Tabel 4. Perbandinga *Shield Parameter* (Θ)

No	e/D	H	d	Θ	S/D	w/D
1	0	11	40	0.048	0.174	1.106
2	0	13	40	0.062	0.230	1.605
3	0	15	40	0.076	0.247	2.079
4	-0.05	11	40	0.048	0.097	1.038
5	-0.05	13	40	0.062	0.172	1.400
6	-0.05	15	40	0.076	0.189	1.825
7	-0.075	11	40	0.048	0.047	0.738
8	-0.075	13	40	0.062	0.136	1.325
9	-0.075	15	40	0.076	0.155	1.800
10	-0.1	11	40	0.048	0.000	0.000
11	-0.1	13	40	0.062	0.013	0.733
12	-0.1	15	40	0.076	0.015	0.751

Tabel 5. Perbandingan Kedalaman Relatif Perairan

No.	e/D	H (cm)	d (cm)	$d/gt2$	S/D	w/D
1	0	11	50	0.051	0.122	0.927
2	0	13	50	0.051	0.129	1.065
3	0	15	50	0.051	0.174	1.475
4	0	11	40	0.041	0.174	1.106
5	0	13	40	0.041	0.23	1.605
6	0	15	40	0.041	0.247	2.079

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Novia Dwi Rahayu dilahirkan di Surabaya, 12 November 1994, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Diponggo Surabaya, SD Negeri Pakis VIII / 375 Surabaya, SMP Negeri 3 Surabaya, SMA Negeri 1 Surabaya. Setelah lulus SMA pada tahun 2012, penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis lebih aktif di Unit Kegiatan Mahasiswa PLH SIKLUS ITS. Penulis berkesempatan melakukan kerja praktek selama 2 bulan di Laboratorium Balai Pantai, Bali. Di akhir studi, penulis mengambil tema *scouring* pada *pipeline* dengan kondisi meletak pada *seabed* dan *in-trench* menggunakan metode eksperimen. Jika ada pertanyaan mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi saya melalui email noviadwirahayu94@yahoo.com.